

EPITRANSSCRIPTÓMICA

La nueva revolución
en epigenética

AGRICULTURA

Xylella, la plaga que
arrasa los olivos

COSMOLOGÍA

Agujeros negros
y materia oscura

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2017 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

LA RED DE LA MEMORIA

Una revolución técnica revela
el modo en que el cerebro conecta
los recuerdos para dar forma
a nuestras experiencias



6,90 EUROS



Women are underrepresented in academic leadership positions. And yet there is a lack of adequate instruments available to help find suitable, excellent women researchers quickly.

AcademiaNet is a database containing the profiles of over 2,400 outstanding women researchers from all disciplines.

The aim of our search portal is to make it easier to find female academics to fill leading positions and to sit on executive committees.

The partners

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

ARTÍCULOS

NEUROCIENCIA

16 **La intrincada red de la memoria**

Una revolución técnica arroja luz sobre el modo en que el encéfalo conecta los recuerdos, un proceso esencial para entender y organizar el mundo que nos rodea. *Por Alcino J. Silva*

AGRICULTURA

24 ***Xylella fastidiosa*, la bacteria que arrasa los olivares**

Un prolongado trabajo de análisis ha demostrado que la bacteria es la causa de la enfermedad que está devastando los olivos en el sur de Italia. *Por Enrico Bucci*

28 **El fracaso de la contención de *Xylella* en Italia**

Por Alison Abbott

30 **Evitar la propagación de *Xylella* en España**

Por Alberto Fereres, Daniele Cornara y Marina Morente

COSMOLOGÍA

34 **Agujeros negros primordiales y materia oscura**

¿Se compone la materia oscura de agujeros negros creados justo después de la gran explosión? *Por Juan García-Bellido y Sébastien Clesse*

ARQUEOLOGÍA

42 **Los vikingos que desaparecieron de Groenlandia**

Poseyeron allí unos gélidos asentamientos durante cientos de años, pero finalmente quedaron abandonados. Nuevos hallazgos arrojan luz sobre su misterioso declive. *Por Zach Zorich*

SERIE: LA INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA (PARTE 3)

56 **El puzzle de la teoría cuántica**

¿Es posible zanjar científicamente el debate sobre la naturaleza del mundo cuántico? *Por Adán Cabello*

MEDICINA

62 **Escáneres ciegos**

Millones de pacientes dependen del tecnecio 99m, un exótico isótopo radiactivo que permite tomar imágenes médicas. Sin embargo, su suministro corre peligro. *Por Mark Peplow*

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

66 **Hacia una inteligencia artificial más humana**

Las máquinas están empezando a incorporar lo que sabemos acerca de la manera en que los niños aprenden sobre el mundo. *Por Alison Gopnik*

INFORME ESPECIAL: EPITRANSCRIPTÓMICA

72 **El epitranscriptoma, un nuevo giro de la epigenética**

El redescubrimiento de marcas químicas en el ARN está conmocionando el estudio de la expresión de los genes. *Por Cassandra Willyard*

78 **El epitranscriptoma del cáncer**

Más allá de los cambios en el genoma y el epigenoma, las modificaciones que se producen en los transcritos del ARN pueden favorecer la aparición de esta enfermedad. *Por Manel Esteller*



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes

El primer *Homo sapiens*. Permiso para contaminar. Reparar un corazón dañado. ¿Pueden oír las plantas? Fuego, hielo y extinciones masivas. Encuentre a mi elefante.

9 Agenda

10 Panorama

La técnica CRISPR permite obtener cultivos resistentes a la contaminación radiactiva. *Por Manuel Nieves-Cordones*

La materia cuántica, vista desde la quinta dimensión. *Por Karl Landsteiner*

Las matemáticas de la literatura. *Por Mark Fischetti*

50 De cerca

La picadura de una medusa. *Por Ainara Ballesteros y Rubén Duro*

52 Filosofía de la ciencia

Los problemas cuánticos inspiran nuevas matemáticas. *Por Robbert Dijkgraaf*

55 Foro científico

Combatir la malnutrición. *Por John Ingram*

84 Taller y laboratorio

En las buhardillas de los liceos. *Por Francis Gires*

90 Juegos matemáticos

Cómo detectar y corregir errores (II). *Por Alejandro Pérez Carballo*

92 Libros

Las cunas de la humanidad. *Por Luis Alonso*

La inteligencia humana contra la inteligencia artificial. *Por Demis Hassabis*

Miguel de Unamuno. *Por José Manuel Chillón*

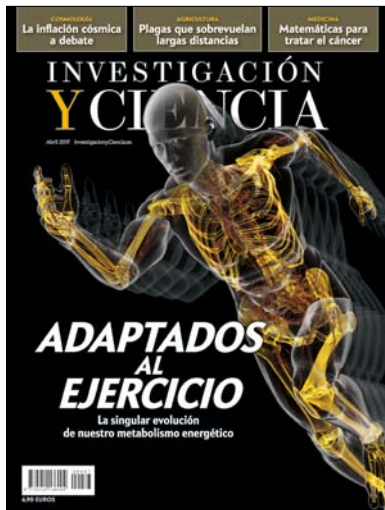
96 Hace...

50, 100 y 150 años.

EN PORTADA

Nuevas técnicas han comenzado a revelar cómo se entrelaza un recuerdo con otro, un fenómeno esencial a la hora de integrar imágenes, sonidos y sensaciones y que contribuye a dar forma y contexto a las experiencias. En los trastornos psiquiátricos y durante el deterioro cognitivo asociado al envejecimiento se observan con frecuencia alteraciones en el establecimiento de estas conexiones de la consciencia. Ilustración de Getty Images





Abril 2017

DEBATE INFLACIONARIO

Quando leí el artículo de Anna Ijjas, Paul Steinhardt y Abraham Loeb [«La burbuja de la inflación cósmica»; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2017], así como la réplica de García-Bellido [«El buen estado de la cosmología inflacionaria»; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2017], imaginé lo que iba a suceder, aunque a menor escala. Después de leer la réplica de los autores a la carta en la que eminentes físicos responden a su artículo [«Controversia cósmica»; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2017], no creo que la situación vaya a mejorar.

Confundir el principio de autoridad con la incuestionable evidencia de que el modelo inflacionario ha sido verificado de forma empírica en múltiples aspectos no me parece acertado. Pero recurrir al argumento de que es necesario explorar los problemas con «mente abierta» —curiosamente, uno de los recursos dialécticos preferidos por los defensores de las pseudociencias—, tampoco. A este respecto, supongo que Ijjas, Steinhardt y Loeb no pensarán que quienes defienden el modelo inflacionario poseen una «mente cerrada». También creo que se debería reflexionar acerca del hecho de que responder con excesiva virulencia ante propuestas que intentamos rebatir no hará que estemos más cargados de razón.

Puede que parte de lo sucedido se deba al, a mi juicio desafortunado, juego de palabras (con evidente tirón periodístico, lo admito) con el que Ijjas, Steinhardt y Loeb decidieron titular su artículo. Una aproximación prudente al debate y una redac-

ción ligeramente distinta podría haber dicho lo mismo, pero de otra manera.

MIGUEL ÁNGEL LAPEÑA
La Alberca, Murcia

Una ciencia fáctica, como la astrofísica, se basa en las constataciones experimentales; si estas contradicen una teoría, la misma falla por completo. El tamaño de un colectivo científico que defiende una teoría no hace en sí parte de su verificación. Sabemos que las ciencias experimentales jamás podrán fundarse en la opinión y siempre buscarán limitar y reducir las subjetividades que puedan sesgar una investigación.

Hace poco leí en una publicación científica que aún hoy en día los físicos no llegan a un acuerdo sobre si la mecánica cuántica es efectivamente una descripción de la realidad o simplemente un artefacto predictivo muy eficiente, ya que no hay consenso en si la función de onda es una entidad real o solo un ingenio matemático. La ciencia no habla de dogmas, ni de verdades absolutas. Una teoría no puede responder a todas las preguntas, evidentemente, pero ¿cuántas anomalías permitirá la comunidad científica que la misma posea? No creo que los científicos deban ofenderse por opiniones dispares, sino buscar más pruebas sobre lo que defienden.

DANIEL MONZÓN
Rivera, Uruguay

Quiero felicitar a todos los científicos que invierten su esfuerzo en el desarrollo de un cuerpo conceptual, léxico y matemático para dar soporte teórico y experimental al modelo inflacionario. Solo desde el conocimiento y la razón es posible refutar con propiedad un artículo de divulgación científica en el que, desafortunadamente para sus autores, ha destacado una fuerte dosis de sensacionalismo científico, eclipsando unas enriquecedoras reflexiones epistemológicas a las que todos estamos invitados.

Al igual que los autores del polémico artículo se han sentido decepcionados con la respuesta de sus colegas, yo, como lector, también me he sentido decepcionado por su réplica, pues nadie que utilice la razón necesita apoyarse en el principio de autoridad. Es pertinente un principio de competencia, razón y conocimiento.

Las descripciones de la realidad con números y palabras siempre estarán sujetas a la imprecisión, en permanente afinación y ampliando su carga conceptual y

significativa. ¡Los científicos también tenéis un trabajo muy lírico! Me sumo a celebrar la buena salud y el buen ritmo de la ciencia empírica. Muchas gracias a todos por vuestras didácticas polémicas, tan fecundas de impulso indagador. «La ciencia será siempre una búsqueda, jamás un descubrimiento real. Es un viaje, nunca una llegada» (Karl Popper).

CÉSAR LEBRATO
Gijón, Asturias

NOTA DE LOS EDITORES: *El título original del artículo de Ijjas, Loeb y Steinhardt era «Pop goes the universe», un juego de palabras intraducible que remite a una canción infantil inglesa y que se apoya en un doble significado de la palabra pop: «explotar» y «popular». El título en castellano («La burbuja de la inflación cósmica») pretendía reflejar ese doble sentido, mantenerse fiel al mensaje de los autores y concordar con las fotografías que acompañaban al texto. Su acierto o desacierto es responsabilidad exclusiva de Investigación y Ciencia.*



Julio 2017

CARTAS DE LOS LECTORES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.º, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



EVOLUCIÓN HUMANA

El primer *Homo sapiens*

Nuevos fósiles hallados en Marruecos obligan a replantear la historia de los humanos anatómicamente modernos

En 1961, durante unos trabajos de minería para extraer barita en las montañas de Jebel Irhoud, a unos 100 kilómetros al oeste de Marrakech, se halló un cráneo humano fósil. En una excavación poste-

rior se descubrieron más huesos de otros individuos, además de restos de animales y herramientas de piedra. En un principio se pensó que correspondían a neandertales de hace 40.000 años, pero más tarde se determinó que en realidad pertenecían a *Homo sapiens* de unos 160.000 de años de antigüedad. Sin embargo, los fósiles resultaban enigmáticos porque en algunos aspectos parecían más primitivos que los más antiguos conocidos de *H. sapiens*.

Ahora, nuevos hallazgos ayudan a reinterpretar los restos de Jebel Irhoud. Un equipo liderado por Jean-Jacques Hublin, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig, ha recuperado más fósiles humanos y herramientas líticas, y ha obtenido otros da-

INVESTIGADORES excavan restos de los primeros humanos en Jebel Irhoud, en Marruecos. En el recuadro inferior se muestra una reconstrucción del cráneo.



CORTESÍA DE SHANNON MCPHERSON (Yacimientos) Y PHILIPP GUNZ (cráneos), INSTITUTO MAX PLANCK DE ANTROPOLOGÍA EVOLUTIVA



tos que indican que el yacimiento es mucho más antiguo que la fecha que se le atribuyó. El equipo publicó los resultados en *Nature* en junio. Si los fósiles pertenecen a *H. sapiens*, tal y como concluyen los investigadores, el origen de nuestra especie sería 100.000 años más antiguo y cambiaría algunas de las hipótesis sobre dónde y cómo evolucionó nuestro linaje. No obstante, otros científicos no están de acuerdo sobre el significado de los nuevos hallazgos. Lejos de solucionar el rompecabezas de nuestros orígenes, los descubrimientos de Jebel Irhoud son una prueba más de que la evolución de nuestra especie fue un proceso muy complejo.

Durante mucho tiempo los expertos han convenido en que el origen de *H. sapiens* se sitúa en África. Hasta la fecha, los restos más antiguos aceptados como representantes de nuestra especie corresponden a los fósiles del yacimiento de Omo Kibish, con 195.000 años de antigüedad, y los de Herto, de 160.000 años, ambos en Etiopía. Sin embargo, los estudios de ADN y algunos fósiles enigmáticos sugerían que nuestra especie podría tener raíces más profundas.

En las excavaciones recientes, Hublin y su equipo descubrieron restos de otros individuos en una parte del yacimiento de Jebel Irhoud que los mineros habían dejado intacta. Los hallazgos incluyen fragmentos de cráneo y una mandíbula, así como numerosas herramientas de piedra y los restos de los animales cazados por los humanos. Además, mediante diferentes métodos de datación determinaron que la capa que contiene los fósiles y artefactos tiene entre 350.000 y 280.000 años de antigüedad.

Los investigadores descubrieron que el tamaño y la forma de la cara, de la mandíbula y de los dientes de Jebel Irhoud eran más próximos a los de *H. sapiens* y más alejados de los neandertales y otros humanos arcaicos. Sin embargo, la forma del cráneo es alargada como en los humanos arcaicos, y no redondeada como en los actuales. Estas variaciones se asocian a diferencias en la organización de nuestro cerebro. En una rueda de prensa, Hublin afirmó que su equipo había llegado a la conclusión de que los fósiles de Jebel Irhoud representan «el origen de nuestra especie, los *H. sapiens* más antiguos hallados en África o en cualquier otro lugar». En su artículo, él y sus colaboradores señalan que los restos revelan que esta población carecía de algunas de nuestras características distintivas, pero que su anatomía podría haber evolucionado gradualmente para convertirse en la nuestra.

Hublin destacó que de sus hallazgos no se desprende que Marruecos sea el lugar de origen de los humanos modernos, sino que indican, junto con otros descubrimientos, que la aparición de *H. sapiens* fue un hecho panafricano. Hace 300.000 años, los primeros *H. sapiens* se habían extendido por todo el continente. A esta dispersión contribuyó el hecho de que África era muy diferente por entonces, puesto que el Sáhara estaba cubierto de vegetación y no era la barrera desértica de hoy en día.

Pero no todos los científicos aceptan la premisa de que los fósiles de Jebel Irhoud pertenecen a *H. sapiens*. El paleoantropólogo John Hawks, de la Universidad de Wisconsin-Madison, apunta que Hublin y su equipo no los han comparado con los hallados en España, de 800.000 años de antigüedad, atribuidos a la especie *Homo antecessor*: «Quizá la población de Jebel Irhoud estaba evolucionando hacia los humanos modernos, pero cabe la posibilidad de que hubiera retenido la morfología de la cara de una población de *H. antecessor*, que pudo haber sido el último antepasado común entre los neandertales y los humanos arcaicos de África».

Para la paleoantropóloga Marta Mirazón Lahr, de la Universidad de Cambridge, los nuevos fósiles plantean preguntas importantes sobre las características que definen nuestra especie. «¿Es la



BOLETINES A MEDIDA

Elige los boletines según tus preferencias temáticas y recibirás toda la información sobre las revistas, las noticias y los contenidos web que más te interesan.

www.investigacionyciencia.es/boletines

forma globular del cráneo, con las implicaciones que tiene en la reorganización del cerebro, lo que permite asignar un fósil a *H. sapiens*? Si es así, la población de Irhoud serían primos cercanos nuestros», pero no pertenecerían a nuestra especie. Por el contrario, si una cara pequeña y la forma de la mandíbula constituyen rasgos clave, entonces los individuos de Jebel Irhoud pueden ser considerados nuestros antepasados directos, lo que, según Mirazón Lahr, hace cambiar el foco de atención de los que estudian los orígenes humanos desde el África subsahariana hasta el Mediterráneo.

En cualquier caso, estos descubrimientos también alimentan el debate sobre quién realizó los utensilios de un período cultural de África denominado Paleolítico medio, hace entre unos 300.000 y

40.000 años. Si hace 300.000 años *H. sapiens* ya estaba presente, él mismo pudo haber sido su autor. Pero existen otros candidatos, ya que en aquella época vivían otras especies humanas, como *Homo heidelbergensis* y *Homo naledi*.

Para el arqueólogo Christian Tryon, de la Universidad Harvard, Jebel Irhoud hace que la imagen se vuelva mucho más compleja. El nuevo indicio significa que a los científicos que estudian los orígenes de nuestra propia especie todavía les queda trabajo por hacer. A veces las cosas más cercanas son también las más enigmáticas.

—Kate Wong

+ Información en nuestra web: goo.gl/YnAW9J

ENERGÍA

Permiso para contaminar

La Bolsa de México pone a prueba un programa para la compra y venta de derechos de emisiones

México comenzó 2017 con una subida del 20 por ciento en los precios de la gasolina, impulsada en parte por la cancelación de subsidios. Algunas protestas acabaron con gasolineras incendiadas: una reacción que pone de manifiesto los problemas que pueden surgir cuando un país decide dejar de subvencionar los combustibles de carbono en beneficio de alternativas menos dañinas para el entorno. Ahora, el Gobierno y la Bolsa mexicana se han propuesto ensayar una estrategia más amable para reducir las emanaciones de carbono: el comercio de derechos de emisión con un límite sobre las emisiones totales (*cap-and-trade*). México, que en 2012 se convirtió en el primer país en vías de desarrollo en aprobar una ley sobre el clima, podría servir de ejemplo a otras economías en desarrollo que aspiren a disminuir su huella de carbono.

En esta clase de programas, el regulador expide permisos para que las empresas puedan contaminar en una cantidad correspondiente a los derechos que posean. La mayoría de las veces, el total de emisiones contaminantes autorizadas disminuye con el tiempo, de modo que las compañías han de decidir: o emiten menos, o compran más permisos a otras empresas.

Ahora, más de 80 compañías mexicanas han aceptado participar en una simulación de este comercio de derechos. Gracias a un programa informático desarrollado por MEXICO₂, una empresa de la Bolsa Mexicana de Valores, las compañías se están acostumbrando a la logística diaria que implica el comercio de permisos, explica Andrés Prieto, analista investigador de MEXICO₂. A finales de 2018, el Gobierno federal obligará a los mayores emisores de México a participar.

El país latinoamericano tiene un acuerdo de cooperación con California, que ya comercia derechos de carbono con varias provincias canadienses. Por ahora, México está aprendiendo de sus vecinos del norte y es posible que acabe por unirse a ese mercado. «La lección importantísima que hemos aprendido en California, comparándola con Europa, es que no basta con estar seguros sobre la cantidad de emisiones», dice Prieto. Las empresas quieren también disponer de una previsión de los precios de los derechos. En el mercado europeo, la volatilidad de los precios desanimó a las empresas a invertir a largo plazo en la reducción de su huella ambiental, a pesar de que el límite total sobre las emisiones era cada vez menor. Puede que, al igual que California, México también exija un precio mínimo para los derechos de emisión a fin de que las empresas puedan calcular mejor su futura posición económica.

A México no le faltan industrias contaminantes, por lo que los avances para reducir las emisiones estarán al alcance si el país puede dotarse de capacidad de regularlas, señala Juan Carlos Altamirano, economista del Instituto Recursos del Mundo, en Washington.

—Lucas Laursen



EN ENERO DE ESTE AÑO, los manifestantes tomaron las calles de México para protestar contra la subida del precio de la gasolina, el llamado *gasolinazo* (1). Autobús en llamas como consecuencia de los disturbios originados por la subida de los precios en 2009 (2).

ALFREDO ESTRELLA, GETTY IMAGES (protesta); DAVID DE LA PAZ, REDUX PICTURES (autobús ardiendo)

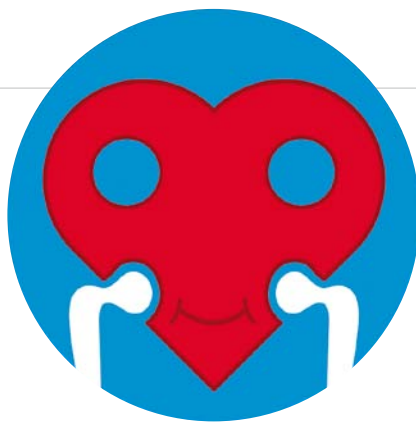
SALUD

Reparar un corazón dañado

Un tratamiento con células madre contra la insuficiencia cardíaca es objeto de un ensayo de referencia

En los días posteriores a un infarto de miocardio, el superviviente y sus seres queridos respiran con alivio porque el peligro inmediato ya ha pasado, pero el tejido cicatricial que se forma durante el largo proceso de curación aún puede infligir daños permanentes. Con demasiada frecuencia limita la capacidad del corazón para llenarse entre latido y latido, trastorno que altera el ritmo y acaba provocando insuficiencia cardíaca. Ahora, un nuevo tratamiento podría ayudar a revitalizar el órgano dañado.

Un grupo de científicos y empresas están intentando evitar o revertir la lesión mediante la administración de una mezcla de células madre en el corazón debilitado. Una empresa de Melbourne, Mesoblast, ya ha iniciado ensayos clínicos de fase avanzada en los



que cientos de enfermos aquejados de insuficiencia cardíaca crónica están recibiendo precursores de células madre obtenidos de la cadera de donantes sanos. Un estudio aleatorizado que incluye un grupo de placebo prevé acabar la admisión de participantes el año próximo.

Los primeros estudios de Mesoblast, publicados en 2015 en *Circulation Research*, llegaron a la conclusión de que las personas tratadas con inyecciones de su mezcla celular no sufrían más tarde problemas vinculados con la insuficiencia cardíaca.

Si el nuevo estudio arroja buenos resultados sería un gran avance para un campo que desde hace tiempo viene siendo blanco de críticas. Se reprocha el mal diseño, la parcialidad o la carencia de grupos de control en los ensayos. También ha perjudicado la aplica-

ción en numerosos centros clínicos de todo el mundo de tratamientos no confirmados.

Otra empresa, la belga TiGenix, espera evitar que se forme el tejido cicatricial tratando a los pacientes con una mezcla de células madre cardíacas en la semana posterior al infarto. Esta estrategia acaba de concluir los ensayos de fase II, pero no se han publicado todavía los resultados.

Aún son muchas las preguntas sin respuesta sobre las células madre —normalmente derivadas del tejido óseo— y el modo en que pueden ayudar a curar el corazón. Las teorías con más peso apuntan a que mitigan la inflamación, revitalizan o estimulan la división de las células cardíacas supervivientes o promueven el nacimiento de nuevos vasos sanguíneos, afirma Richard Lee, director del programa cardiovascular en el Instituto Harvard de Células Madre. Otros especialistas, como Joshua Hare, que dirigió los estudios preliminares de Mesoblast y ahora está al frente del Instituto Interdisciplinar de Células Madre de la Universidad de Miami, afirma que las células pueden actuar de múltiples formas para curar el tejido cicatricial. En su opinión, podrían acabar convirtiéndose en un «tratamiento regenerativo de verdad».

—Dina Fine Maron

BIOLOGÍA

¿Pueden oír las plantas?

La flora podría percibir el rumor del agua y el mordisqueo de los insectos fitófagos

Hay quien afirma que la música acelera el crecimiento de las plantas, a pesar de las magras pruebas que avalan semejante aseveración pseudocientífica. Pero nuevas investigaciones indican que algunos vegetales podrían percibir sonidos, como el gorgoteo del agua a través de una tubería o el zumbido de los insectos.

En un estudio reciente, Monica Gagliano, bióloga evolutiva de la Universidad de Australia Occidental, y sus colaboradoras depositaron plántulas de guisante en frascos con forma de Y invertida. Uno de los brazos del frasco se apoyaba sobre una bandeja con agua o un tubo enroscado de plástico a través del cual circulaba el líquido elemento; el otro descansaba sobre tierra seca. Las raíces crecieron hacia el brazo del agua, tanto si esta era fácilmente accesible como si circulaba oculta por el tubo. «Sabían que el agua estaba allí, aunque lo único que podían percibir era el rumor a su paso por la tubería», asegura. Pero cuando se les dio la opción de escoger entre el tubo de agua y tierra húmeda, las raíces optaron por la segunda. Gagliano plantea la hipótesis de que las plantas se sirven de las ondas sonoras para detectar el agua en la distancia pero siguen el gradiente de humedad para alcanzar su objetivo cuando se hallan cerca.

La investigación, descrita hace unos meses en *Oecologia*, no es la primera en sugerir que los vegetales detectan e interpretan los sonidos. Un estudio de 2014 mostró que la crucifera *Arabidopsis* distingue el sonido causado por la masticación de una oruga y las vibraciones del viento: segregó más toxinas tras «escuchar» la grabación

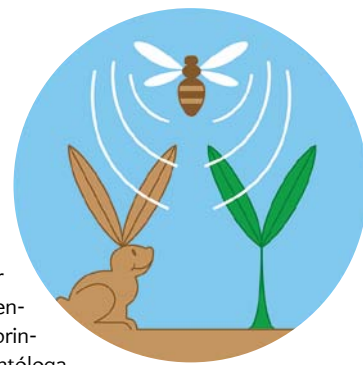
de los insectos comiendo. «Tendemos a subestimar las plantas porque nuestros sentidos no perciben bien sus respuestas. Pero las hojas han resultado ser unos detectores de vibraciones sumamente sensibles», asegura la investigadora principal del estudio Heidi M. Appel, ambientóloga radicada ahora en la Universidad de Toledo en EE.UU.

Otra pista sobre la capacidad auditiva de las plantas la aporta el fenómeno de la «polinización por zumbido», en la que cierta frecuencia del sonido del vuelo estimula la liberación del polen.

Michael Schöner, biólogo de la Universidad de Greifswald que no ha participado en esta novedosa investigación, cree que podrían poseer órganos capaces de captar sonidos. «Las vibraciones sonoras desencadenarían la respuesta de la planta a través de mecanorreceptores, que adoptarían la forma de estructuras filiformes muy delgadas, que podrían actuar como una membrana vibrátil», explica.

Esta investigación plantea dudas sobre si la contaminación acústica afectaría tanto a la flora como a la fauna, observa Gagliano: «El ruido podría bloquear canales de comunicación entre las plantas; por ejemplo, para advertir a sus iguales de la presencia de insectos fitófagos.» Así que la próxima vez que ponga en marcha el cortacésped o el soplado de hojas en su jardín, procure no molestar demasiado.

—Marta Zaraska





NUEVOS INDICIOS sugieren que, hace cientos de millones de años, gigantescas erupciones volcánicas acabaron desencadenando una edad de hielo que provocó la primera extinción masiva de la Tierra, responsable de la desaparición de la mayoría de las especies marinas.

GEOLOGÍA

Fuego, hielo y extinciones masivas

Varios indicios sugieren que los volcanes participaron en las cinco grandes extinciones del planeta

Hace unos 450 millones de años, una región que probablemente tenía el tamaño de Europa comenzó a estirarse y desgarrarse. Se abrieron grandes hendiduras en la corteza terrestre y por ellas manó lava en forma de luminosas paredes de hasta 500 metros de altura. Aunque el suelo acabó apaciguándose, el daño no había hecho más que empezar. Una vez que la lava se endureció, la lluvia y otros fenómenos retiraron de la atmósfera el dióxido de carbono emitido por las erupciones, lo que contribuyó a un complejo proceso de enfriamiento global. Los glaciares avanzaron masivamente y el nivel del

mar descendió: el planeta se sumió en una edad de hielo que acabó con el 85 por ciento de las especies marinas.

Esta hipotética situación de fuego y hielo acaba de ser defendida en un artículo publicado hace poco en la revista *Geology*. En caso de confirmarse, los resultados aportarían el primer indicio sólido sobre qué causó la primera extinción masiva en la Tierra, para la que hasta ahora se habían propuesto todo tipo de explicaciones: desde metales tóxicos liberados en los mares hasta la radiación de una explosión cósmica de rayos gamma. Además, ello pondría a la extinción del Ordovícico tardío en buena compañía: las otras cuatro ya se habían asociado a erupciones volcánicas [véase «Erupciones volcánicas y extinciones masivas», por Howard Lee; *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*, agosto de 2016].

David Jones, geólogo de la Escuela Universitaria de Amherst y autor principal del estudio, no esperaba que ese fuera el caso de la extinción ordovícica. En un principio, se había propuesto refutar la explicación volcánica; sin embargo, cuando «cocinó» en el laboratorio rocas del Ordovícico tardío proce-

des de Nevada y del sur de China, se liberaron grandes cantidades de mercurio, una señal reveladora de la actividad volcánica.

Los investigadores esperan ahora localizar una «gran provincia ígnea» (una vasta zona de lava endurecida) que se remonte a la época de la extinción. «Es como si vas a la escena de un crimen y encuentras un cadáver con un agujero de bala. El paso siguiente es buscar la pistola», ejemplifica Seth Burgess, geólogo del Servicio Geológico de Estados Unidos que no participó en el estudio. Si la encuentran, afirma, mirarán si hay «rastros de pólvora en ella».

Jones ya ha comenzado su labor de detective. Aunque él y sus colaboradores sospechan que los volcanes acabaron desencadenando una edad de hielo global, Burgess y otros creen que la historia es más compleja, ya que los volcanes suelen provocar el calentamiento de la atmósfera, no su enfriamiento. Con todo, con las cinco extinciones masivas ligadas a erupciones volcánicas, los geólogos podrán empezar a desentrañar los detalles de cada asesinato.

—Shannon Hall

SEBASTIÁN CRÉSPO, GETTY IMAGES (lava); ULET IFANSATI, GETTY IMAGES (humo)

Encuentre a mi elefante

La tecnología podría dar una baza decisiva a los conservacionistas frente a los cazadores furtivos

¿Cómo proteger a los elefantes de los cazadores furtivos en una reserva que tiene la extensión de un país pequeño? Esta abrumadora tarea recae casi siempre en guardas que pasan semanas patrullando a pie y, en ocasiones, desprovistos del equipo más elemental, como radiotransmisores, tiendas de campaña o incluso calcetines. Por ello, no es extraño que estén perdiendo la batalla contra los traficantes de marfil, tal y como muestran los últimos datos sobre los dos paquidermos africanos, ambos amenazados: el censo del elefante de sabana cayó en un 30 por ciento entre 2007 y 2014, mientras que el del elefante de bosque lo hizo en un 62 por ciento entre 2002 y 2011.

A fin de contener la debacle, los conservacionistas están recurriendo cada vez más a la tecnología. Su última arma consiste en collares de seguimiento en tiempo real desarrollados por la ONG keniana Save the Elephants, colocados hasta ahora en más de 325 animales en diez países. La organización ha diseñado algoritmos que procesan las señales de los collares para detectar cuándo su portador cesa de moverse (un indicio de que tal vez haya muerto), enlentece su marcha (quizá por estar herido) o se encamina hacia una zona peligrosa donde se sabe que hay furtivos. Los acelerómetros detectan comportamientos anormales, como estampidas súbitas que podrían delatar una emboscada. A diferencia de los collares al uso, que emiten sus coordenadas geográficas en largos intervalos temporales o las graban para su consulta posterior, la inmediatez de la transmisión permite a los guardas reaccionar rápido: en varios casos, su intervención ha propiciado detenciones.

Sin embargo, el volumen de datos generado pronto se tornó excesivo, por lo que Save the Elephants buscó la colaboración de Vulcan (una empresa creada por Paul Allen, el cofundador de Microsoft), que diseñó Domain Awareness System (DAS), una aplicación de seguimiento en código abierto para iOS y la Web. DAS envía alarmas cuando detecta un posible problema (si un elefante echa a correr, por ejemplo) o



GRACIAS a tecnología de vanguardia, un nuevo tipo de collar de seguimiento para elefantes está ayudando a combatir la caza furtiva en África.

si los sensores sobre el terreno captan intrusos humanos. También integra un caudal de información de otro tipo, como la ubicación de los guardas, los vehículos y los medios aéreos más cercanos, así como disparos detectados, imágenes tomadas por cámaras-trampa, fichas de antecedentes y atestados, o datos meteorológicos.

Algunas de las técnicas del collar, como GPS, almacenamiento de datos in situ, receptores telefónicos o de satélite, son hoy habituales en los teléfonos inteligentes. Pero, en este caso, se están usando de un modo único, sostiene Jake Wall, asesor en tecnología geoespacial de Save the Elephants. El experto asegura que es la primera vez que el torrente de datos que usa DAS se presenta a través de canales y mapas ordenados y prácticos.

Una versión inicial del programa se encuentra en pruebas en cuatro lugares de África, que en septiembre se prevé que aumenten a diez. En la reserva natural de Lewa, en Kenia, DAS se considera una herramienta revolucionaria desde que comenzó a usarse hace menos de un año, señala Batian Craig, director de 51 Degrees, la compañía que supervisa las operaciones de seguridad de Lewa: «Visualizar toda esa información en cualquier lugar y en el acto supone un cambio radical para los responsables de las zonas protegidas».

—Rachel Nuwer

CONFERENCIAS

21 de septiembre — Ciclo

Quin és el futur del diagnòstic i tractament de l'alzheimer?

Rafael Blesa, neurólogo del HSCSP
Hospital de la Santa Creu i Sant Pau
(HSCSP), Barcelona
www.santpau.cat

30 de septiembre — Jornada

Naukas Valladolid 2017: La ciencia del futuro

Teatro Calderón
Valladolid
naukas.com

EXPOSICIONES

Hasta el 17 de septiembre

Leishmania: No solo en tu mascota

Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



OTROS

5 de septiembre — Taller

Descubriendo la luz

Dirigido a estudiantes de primaria
Organiza: Instituto de Óptica Daza de Valdés (CSIC)
Palacio Real Testamentario de Isabel la Católica
Medina del Campo
www.ciudadciencia.es

6-8 de septiembre — Curso

La ciencia toma la palabra: Los problemas sociales de las pseudociencias en la era de la información

Universidad de Alicante
gplsi.dlsi.ua.es/lacienciaprenlaparaula

29 y 30 de septiembre — Jornada

Noche Europea de los Investigadores

Actividades divulgativas en más de 250 ciudades europeas
ec.europa.eu

Talleres en institutos

Ciencia para llevar 2017-2018

Talleres y debates de biomedicina y biotecnología para grupos de secundaria y bachillerato
Organiza: BIOcomuniCAT
Institutos de toda Cataluña
ciencia-per-emportar.com

La técnica CRISPR permite obtener cultivos resistentes a la contaminación radiactiva

Este método de edición genética se ha empleado para inactivar en las plantas de arroz el transporte del cesio radiactivo depositado en el suelo

MANUEL NIEVES-CORDONES

La contaminación radiactiva provocada por los accidentes en las centrales nucleares de Chernóbil, en 1986, y de Fukushima, en 2011, afectó a grandes extensiones de terreno agrícola (miles de kilómetros cuadrados). El cesio (Cs) radiactivo que se liberó al ambiente plantea uno de los mayores problemas para la agricultura, puesto que se acumula fácilmente en el suelo y desde allí es absorbido por las plantas a lo largo de décadas.

En Fukushima se produjo una gran emisión de isótopos radiactivos de Cs: $^{134}\text{Cs}^+$ y $^{137}\text{Cs}^+$ (de una vida media de 2 y 30 años, respectivamente). Se estima que la mitad de la superficie de Japón fue contaminada con ellos. El arroz, un alimento básico, ha sido el cultivo más afectado en el país. El Cs^+ radiactivo es absorbido por la raíz junto con los nutrientes minerales y el agua, después es transportado a la parte aérea y finalmente se acumula en los granos de arroz. El elemento radiactivo no ejerce un efecto tóxico sobre la propia planta, ya que se halla a bajas concentraciones (del orden de micromoles por litro), pero en los granos de arroz alcanza mayores valores y podría ocasionar problemas de salud a las personas que lo consumen.

El accidente de Fukushima provocó numerosas complicaciones para los agricultores y autoridades sanitarias en Japón, que debieron implantar controles exhaustivos antes de la comercialización del arroz. Se han empleado diferentes estrategias para reducir los niveles de Cs^+ radiactivo en el cereal, como la eliminación de la capa superficial del suelo mediante retroexcavadoras o la adición de grandes cantidades de fertilizantes de potasio (K) (ya que disminuye la entrada de Cs^+ en la planta), pero ambas estrategias presentan inconvenientes. Además de su elevado coste, la retirada de suelo genera grandes cantidades de basura radiactiva

que hay que almacenar durante años en instalaciones especializadas. Por otro lado, el exceso de fertilizantes da lugar a una eutrofización de los ecosistemas.

Otra solución consistiría en obtener variedades de arroz con una baja capacidad de acumular cesio, pero existe el obstáculo de que no se han descrito genes que participen en la acumulación de este elemento en la planta.

Hace poco, nuestro grupo del Instituto de Biología Integral de las Plantas, en Montpellier, en colaboración con un equipo de la Universidad de Tokio, ha indagado en una alternativa prometedora basada en la técnica de edición genética CRISPR-Cas9. Con ella hemos desarrollado plantas de arroz que, de modo selectivo, no absorben el Cs^+ radiactivo del suelo. La estrategia ofrece una opción de enorme interés para evitar el efecto de la contaminación radiactiva en los cultivos de plantas alimentarias.

Cerrar el paso al cesio radiactivo

En nuestra investigación, llevada a cabo en el marco del proyecto DEMETERRES, partimos de la hipótesis de que existen proteínas de membrana que transportan el Cs^+ del suelo contaminado al interior de las células de la raíz. Se consideró que este paso era determinante en la cantidad de Cs^+ que acumularía después la planta y, en consecuencia, los granos de arroz. Por ello, procedimos a caracterizar en una primera etapa el mecanismo de entrada del Cs^+ en la raíz. Los resultados mostraron que, aunque el Cs^+ no es un nutriente que las plantas de arroz necesiten, estas tienen una alta capacidad para absorberlo cuando se halla a bajas concentraciones (del orden de micromoles por litro). Curiosamente, esta capacidad de absorción se asemejaba, en términos cuantitativos y cualitativos, a la del K^+ , un macronutriente que sí resulta esencial para las plantas.

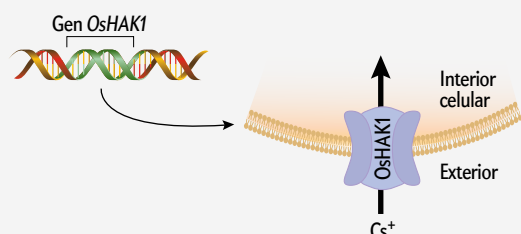
El Cs^+ es un catión con características similares al K^+ (ambos son metales alcalinos de la columna I de la tabla periódica), y en varias ocasiones las proteínas transportadoras del K^+ se han relacionado con las del Cs^+ . Por ello, en una etapa posterior, se caracterizaron proteínas de la planta de arroz con el fin de averiguar cuáles funcionarían mejor como transportadoras del Cs^+ . Los datos apuntaron a un transportador de K^+ , llamado *OsHAK1*, como principal candidato.

En un siguiente paso examinamos cómo se comportaría una planta de arroz que careciera de este transportador. Mediante la técnica CRISPR-Cas, inactivamos el gen que codifica la proteína *OsHAK1*. Diseñamos un «ARN guía simple» (ARNgs) para que condujese la nucleasa Cas9 (enzima que corta el ADN) hasta el gen *OsHAK1*. Este ARNgs posee una secuencia de 20 nucleótidos que es complementaria con una secuencia del inicio del gen *OsHAK1*. Una vez allí, Cas9 produce un corte de las dos cadenas de ADN al lado de una secuencia conocida como PAM (del inglés, *protospacer adjacent motif*). La reparación de este corte provoca mutaciones en la secuencia (inserción o eliminación de unos pocos nucleótidos) que suelen implicar un cambio de la fase de lectura en el inicio del gen *OsHAK1*. Como consecuencia, se produce una versión muy corta de la proteína *OsHAK1*, que resulta inactiva y, por tanto, impide la entrada de Cs^+ (además de la del K^+).

Para que las plantas contaran con el ARNgs y la proteína Cas9 que les permitieran inactivar el gen *OsHAK1*, introdujimos en su ADN las secuencias genéticas que los codifican sirviéndonos de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*. Tras ese paso, realizado en cultivos in vitro, hicimos crecer las plantas y comprobamos si presentaban mutaciones en el gen *OsHAK1*. Observamos que 34 de las 41

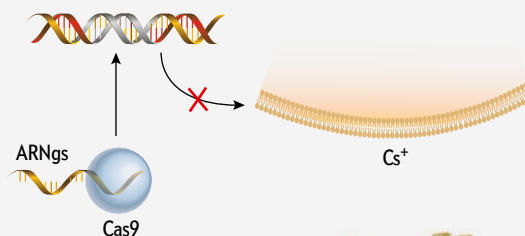
PLANTAS QUE ELUDEN LA CONTAMINACIÓN

Mediante experimentos se han obtenido plantas de arroz que, a pesar de ser cultivadas en suelos contaminados con cesio (Cs^+) radiactivo, acumulan una cantidad muy baja de este elemento. Mediante la técnica CRISPR-Cas se ha inactivado en las plantas el gen *OsHAK1*, el responsable de una proteína de membrana que transporta el Cs^+ del suelo hacia las células de la raíz y, de estas, hacia el resto de la planta y los granos de arroz.



Plantas con el gen normal

Cuando crecen en suelos contaminados absorben el cesio radiactivo $^{137}\text{Cs}^+$ por medio de la proteína de membrana *OsHAK1*, codificada por el gen *OsHAK1*. La proteína transporta el elemento hacia el interior de las células de toda la planta, hasta los granos de arroz.



Plantas con el gen editado

Se induce en las plantas la producción de un ARN guía simple (ARNgs) y la proteína Cas9, conjunto que inactiva el gen *OsHAK1*. Las plantas carecen de la correspondiente proteína de membrana, por lo que dejan de acumular el cesio radiactivo.



plantas (un 83 por ciento) las contenían. Además, constatamos que no se habían dado mutaciones en secuencias similares a las que deseábamos modificar, lo que demostró que nuestra estrategia era eficaz y específica.

El efecto en las plantas

Examinamos a continuación cómo respondían las plantas sometidas a la edición genética ante la presencia de Cs^+ . Llevamos a cabo ensayos con dos grupos de plantas: las del primero tenían el gen *OsHAK1* inactivado, mientras que las del segundo no (grupo de control). Comprobamos que las plantas con el gen editado presentaban una capacidad muy limitada de acumular Cs^+ en comparación con las de control, tanto en la raíz como en la parte aérea.

En estos primeros ensayos estudiamos el efecto del $^{137}\text{Cs}^+$, un isótopo no radiactivo. Para validar los resultados con el elemento radiactivo, contamos con la colaboración de un equipo de investigadores de la Universidad de Tokio. Estos realizaron ensayos con los dos grupos de plantas mediante su cultivo en dos suelos

recogidos cerca de Fukushima: uno poco contaminado de $^{137}\text{Cs}^+$ (7000 becquerelios por kilogramo de suelo; Bq/kg) y otro muy contaminado (2.000.000 Bq/kg). En el suelo poco contaminado se observó que ambos tipos de plantas producían cantidades similares de arroz (no hubo un efecto negativo de la edición genética en la productividad). Ambas plantas mostraron también niveles equiparables de $^{137}\text{Cs}^+$ en la raíz, la parte aérea y los granos. En estos últimos se registraron valores de 20 Bq/kg, muy inferiores al umbral de $^{137}\text{Cs}^+$ radiactivo establecido por la Unión Europea (600 Bq/kg). Por el contrario, en el suelo muy contaminado se comprobó que las plantas de control alcanzaban unos niveles altos de $^{137}\text{Cs}^+$ (3000 veces superiores a los acumulados en el primer suelo). En cambio, las plantas con el gen editado mostraron unos niveles de $^{137}\text{Cs}^+$ más bajos en la raíz que las plantas de control (30 veces inferiores). Sorprendentemente, estas diferencias fueron aún mayores en la parte aérea, con unos valores 70 veces inferiores en las plantas tratadas con respecto a las de control.

Es decir, la inactivación de la proteína *OsHAK1* limitó de manera notable el transporte de Cs^+ a la parte aérea. Aunque en los experimentos se cosecharon las plantas antes de que produjeran los granos, puede estimarse la concentración de $^{137}\text{Cs}^+$ en ellos teniendo en cuenta que, según indican numerosos estudios, esta equivale aproximadamente a 1/4 de la que presenta la parte aérea. El arroz de las plantas de control, con un valor estimado de 37.500 Bq/kg, no sería consumible en Europa, mientras que el de las plantas con el gen editado, con menos de 500 Bq/kg, sí lo sería.

Perspectivas

Con este trabajo hemos extraído varias conclusiones de interés acerca de la proteína transportadora *OsHAK1*: primero, que discrimina muy mal entre el K^+ y el Cs^+ y transporta ambos cationes de manera similar; segundo, que contribuye a la acumulación de $^{137}\text{Cs}^+$ cuando el nivel de contaminación es elevado; y, por último, que puede desempeñar también un papel en la movilización del Cs^+ a través de los

tejidos vasculares hacia la parte aérea. La suma de estos tres factores explicaría por qué la inactivación de esta proteína en las plantas evita la acumulación en ellas del Cs^+ radiactivo.

No hay que olvidar que, con la edición genética, *OsHAK1* deja de transportar también K^+ , un nutriente esencial para la planta. Afortunadamente, hay otras proteínas que transportan K^+ pero no Cs^+ , por lo que las plantas sin *OsHAK1* muestran efectos menos importantes con respecto a la absorción de K^+ .

Este trabajo abre la puerta a la obtención de variedades de arroz bajas en Cs^+ radiactivo que podrían cultivarse en las zonas contaminadas. Dado que existen genes homólogos de *OsHAK1* en otras

especies, como en la cebada o el tomate, es muy probable que la estrategia que hemos empleado para el arroz pueda aplicarse a otros cultivos. Por otro lado, el sistema CRISPR-Cas permite obtener plantas con el gen de interés editado y sin secuencias exógenas (transgenes). Ello hace de esta técnica una alternativa más interesante que los cultivos transgénicos.

—Manuel Nieves-Cordones
Instituto de Biología Integral
de las Plantas
Instituto Nacional
para la Investigación Agronómica
de Francia
Montpellier

PARA SABER MÁS

Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. T. J. Yasunari et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, n.º 49, págs. 19.530-19.534, 2011.

Opportunities for products of new plant breeding techniques. J. G. Schaart et al. en *Trends in Plant Science*, vol. 21, n.º 5, págs. 438-449, 2016.

Production of low- Cs^+ rice plants by inactivation of the K^+ transporter *OsHAK1* with the CRISPR-Cas system. M. Nieves-Cordones et al. en *Plant Journal*, (en prensa).

EN NUESTRO ARCHIVO

CRISPR llega a los cultivos. Stephen S. Hall en *IyC*, septiembre de 2016.

MATERIALES

La materia cuántica, vista desde la quinta dimensión

La teoría de cuerdas como herramienta para investigar los estados topológicos de la materia

KARL LANDSTEINER

El premio Nobel de física de 2016 fue concedido por el descubrimiento de los materiales topológicos, fases cuánticas de la materia cuyas exóticas propiedades auguran desde mejores dispositivos electrónicos hasta ordenadores cuánticos. En los últimos años, este incipiente campo de investigación ha vivido avances considerables; entre ellos, el descubrimiento experimental de nuevas fases topológicas. En el plano teórico, algunos progresos han venido de un área insospechada para muchos: la teoría de cuerdas y las matemáticas de los agujeros negros en cinco dimensiones espaciotemporales.

¿Cómo es posible que los modelos que empleamos para describir la gravedad y la física de partículas a energías muy elevadas sirvan también para investigar el comportamiento de los electrones de un material? La razón obedece a lo que en física llamamos «universalidad»: a menudo, los detalles asociados a los constituyentes microscópicos de un sistema y sus interacciones no resultan tan importantes como las limitaciones que imponen la simetría y la topología. Si las ecuaciones básicas de dos sistemas físicos comparten ciertas simetrías y propiedades topológicas, su comportamiento será el mismo

con independencia de que hablemos de agujeros negros, quarks a altas energías o electrones en un cristal.

En una serie de trabajos recientes realizados junto con otros investigadores, hemos empleado tales herramientas para analizar las propiedades de ciertos materiales topológicos descubiertos experimentalmente hace muy poco: los semimetales de Weyl.

Simetría y topología

En general, hablamos de una simetría cuando podemos transformar un objeto de cierta manera y el resultado es equivalente al objeto original. En mecánica cuántica, la función de onda es un número complejo que, como tal, viene dado por un valor absoluto y una «fase», o ángulo. Esto puede representarse como una flecha en un plano: la longitud de la flecha representa el valor absoluto del número complejo, mientras que el ángulo que esta subtiende con el eje horizontal corresponde a la fase.

Cambiar la fase de un estado cuántico equivale a rotar esa flecha un cierto ángulo alrededor del origen. En general, tales rotaciones constituyen simetrías en mecánica cuántica, ya que no alteran las

propiedades observables del estado físico. Imaginemos ahora un electrón en el seno de un cristal y supongamos que lo desplazamos a lo largo de un camino cerrado. Al volver al punto de partida, la fase de la función de onda podrá haberse desplazado hacia delante y hacia atrás. Sin embargo, puede que tal vez haya dado una o más vueltas alrededor del origen. En este segundo caso decimos que existe un índice topológico: el número que indica cuántas vueltas completas ha descrito la fase de la función de onda.

En ciertos cristales, la función de onda que describe las cuasipartículas electrónicas (excitaciones colectivas de los electrones) está caracterizada por tales índices topológicos. En los semimetales de Weyl, ello implica que las cuasipartículas son de dos tipos: «dextrógiras» o «levógiras». Eso significa que se comportan como fermiones cuyo espín apunta, bien en el sentido de su momento, o bien en el sentido opuesto.

Estas partículas son muy conocidas en física teórica. Sus propiedades matemáticas fueron analizadas hace casi noventa años por el matemático alemán Hermann Weyl, motivo por el que se conocen como fermiones de Weyl. Las partículas elementales de espín 1/2, como los electrones o

los quarks, no pertenecen a esta clase, pero pueden entenderse como una combinación de un fermión de Weyl dextrógiro y otro levógiro. Como consecuencia, estos estados han sido siempre muy estudiados en física de partículas elementales.

Fermiones de Weyl en física de partículas

Las rotaciones de fase de las funciones de onda asociadas a los fermiones de Weyl dextrógiros y a los levógiros pueden llevarse a cabo de forma independiente. Eso implica que, en una teoría de partículas que incluya fermiones de Weyl, tendremos en realidad dos simetrías: los cambios de fase que afectan a las partículas dextrógiros y los que atañen a las levógiros. En física, las simetrías suelen estar asociadas a leyes de conservación. En este caso, lo que se conserva es el número de fermiones de Weyl de cada clase.

Sin embargo, los efectos cuánticos pueden arruinar las simetrías que «protegen» a los fermiones de Weyl. Hace tiempo que se sabe que, en presencia de campos eléctricos y magnéticos paralelos, un fermión de Weyl levógiro puede desvanecerse sin dejar huella y, en su lugar, se crea un fermión dextrógiro a partir del vacío. Esta pérdida de simetría como consecuencia de un efecto cuántico recibe el nombre de «anomalía». Pero hay más: las propiedades matemáticas de los fermiones de Weyl indican que la misma pérdida de simetría debería darse en presencia de campos gravitatorios. Este fenómeno se conoce como «anomalía gravitacional».

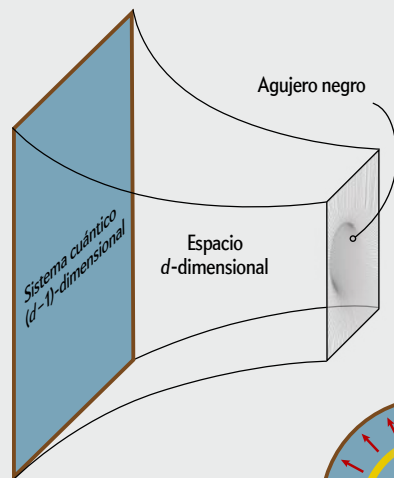
El primer tipo de anomalía se conoce bien. En física de partículas elementales permite explicar la desintegración del pion neutro en dos fotones, mientras que en los semimetales de Weyl da cuenta de la disminución de la resistencia que surge al aplicar un campo magnético. Las anomalías gravitacionales, sin embargo, resultan mucho más misteriosas. La razón es simple de entender: tanto en los sistemas de partículas elementales a altas energías como en los electrones de un cristal, los efectos de la gravedad son tan minúsculos que, en la práctica, resultan imposibles de medir. Además, el tratamiento matemático de las anomalías gravitacionales reviste mayor complejidad que el asociado a las inducidas por campos eléctricos y magnéticos.

Holografía

Sin embargo, existe una herramienta que nos permite «traducir» todas esas sutilezas a las propiedades matemáticas de

DE LOS AGUJEROS NEGROS A LOS MATERIALES TOPOLÓGICOS

La dualidad de Maldacena, un resultado obtenido en teoría de cuerdas a finales de los años noventa, permite relacionar ciertos sistemas cuánticos con la física de la gravedad en una dimensión espacial más. Hace poco este enfoque se ha aprovechado para investigar las propiedades de los semimetales de Weyl, materiales topológicos cuyas excitaciones electrónicas se comportan como fermiones de Weyl, un tipo de partículas de gran importancia en física teórica.



Sombras cuánticas: Las propiedades matemáticas de los agujeros negros en un espacio de d dimensiones pueden «proyectarse» sobre una superficie de una dimensión espacial menos (azul). La dinámica de la gravedad en d dimensiones determina las propiedades de ciertos sistemas cuánticos en $d - 1$ dimensiones.

Viscosidad y gravitación: Tales métodos han permitido derivar la viscosidad de los electrones en los semimetales de Weyl (azul). Al agitar este fluido cuántico en un sentido u otro (flechas amarillas), además de la viscosidad habitual (flechas negras), aparece una componente perpendicular llamada «viscosidad de Hall» (flechas rojas). Curiosamente, puede demostrarse que este extraño comportamiento aparece solo si los fermiones de Weyl interactúan de cierta manera con la gravedad.



lezas a las propiedades matemáticas de los agujeros negros en cinco dimensiones espaciotemporales (cuatro espaciales más el tiempo), las cuales resultan comparativamente más fáciles de tratar. Esta es la célebre dualidad de Maldacena (conocida en términos técnicos como «correspondencia AdS/CFT»), descubierta en teoría de cuerdas a finales de los años noventa por Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Gracias a ella, hoy sabemos que numerosos sistemas cuánticos en cuatro dimensiones admiten una descripción «dual», o equivalente, en términos de la teoría de cuerdas en cinco dimensiones. La razón por la que la descripción dual involucra con frecuencia agujeros negros se debe a que la teoría de cuerdas constituye una teoría de gravedad cuántica, por lo que los agujeros negros (configuraciones relativamente sencillas del campo gravitatorio) aparecen de manera natural.

Es en cierto modo, podemos pensar en esta equivalencia como en la alegoría de la cueva de Platón. Los prisioneros en el interior de la cueva no pueden ver los objetos del exterior, sino solo sus sombras proyectadas en la pared, por lo que para ellos estas constituyen su única realidad. En esta analogía, la forma tradicional de entender la mecánica cuántica sería como contemplar las sombras. La dualidad de Maldacena constituye una herramienta que nos permite mirar «fuera de la cueva» y apreciar una dimensión adicional. (Una diferencia importante reside en que, al contrario de lo que ocurre con el ejemplo de las sombras, las dos descripciones duales de la correspondencia de Maldacena codifican exactamente la misma información, solo que organizada de forma muy distinta.) Esta correspondencia matemática entre fenómenos cuánticos y gravitatorios se denomina también «holográfica» porque, en un holograma tradicional, la

información contenida en una placa de dos dimensiones permite proyectar una imagen tridimensional.

Las dos metáforas que acabamos de mencionar relacionan una superficie de dos dimensiones con un espacio tridimensional. En el caso que nos ocupa, la dualidad funciona del mismo modo pero entre tres dimensiones espaciales más el tiempo (el espacio en el que «viven» los fermiones de Weyl, ya sea en física de partículas o en física de materiales) y cuatro dimensiones más el tiempo (el espacio en el que se encuentra el agujero negro).

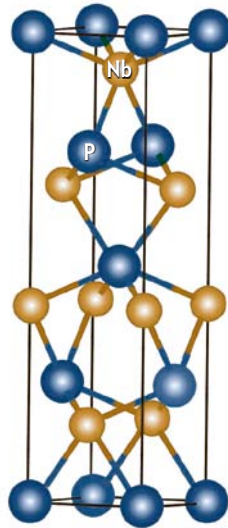
Viscosidad cuántica

Estas dualidades holográficas permiten extraer información no trivial sobre las propiedades de los semimetales de Weyl. Un parámetro importante para describir el comportamiento de los electrones en un sólido es su viscosidad. En un líquido normal, todos experimentamos este fenómeno a diario: al remover una taza de café, té o leche, la cuchara provoca que gire todo el líquido, no solo las partes que están en contacto con el metal. Este fenómeno se debe al rozamiento interno que experimentan las partículas del fluido. Sin embargo, ¿qué pasaría si el líquido de nuestra taza fuera un estado cuántico topológico?

En 2015, durante un congreso en Utrecht, le formulé esta pregunta a Duncan Haldane, físico de la Universidad de Princeton y uno de los investigadores que el año pasado recibieron el premio Nobel por el descubrimiento de los materiales topológicos. Aunque buena parte de los mayores expertos mundiales en el campo se habían reunido allí, nadie sabía qué ocurriría. Para responderla sugerí utilizar los métodos derivados de la teoría de cuerdas, puesto que tales modelos ya se habían empleado con éxito para entender la viscosidad de otro estado exótico de la materia: el plasma de quarks y gluones, recreado en las colisiones entre iones pesados que se llevan a cabo en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Ginebra.

Las ecuaciones de la dualidad holográfica permiten describir agujeros negros en cinco dimensiones con las mismas propiedades de simetría y topología que los electrones en un semimetal de Weyl. En esta equivalencia, la temperatura del agujero negro determina la temperatura del cristal, mientras que moverse en la quinta dimensión corresponde a cambiar la energía del sistema cuántico.

En un trabajo realizado junto con Yan Liu y Ya-Wen Sun, del Instituto de



ESTRUCTURA CRISTALINA del fosfuro de niobio (NbP), un semimetal de Weyl.

Física Teórica de Madrid, y publicado el año pasado en *Physical Review Letters*, analizamos el comportamiento del sistema gravitatorio y pudimos demostrar que este implicaba la existencia de varias fases en el sistema cuántico. Bajo ciertas condiciones, el material se comporta como un semimetal con excitaciones de tipo Weyl, pero bajo otras lo hace como un metal habitual o incluso como un aislante. También encontramos un nuevo estado, el cual quedaba definido por el momento preciso en el que los electrones comienzan a desarrollar el comportamiento típico de Weyl. Este es el estado que se encuentra justo en la frontera entre un semimetal de Weyl y uno normal.

Poco después conseguimos calcular la viscosidad asociada al estado de transición a un semimetal de Weyl. Nuestros resultados, publicados también en *Physical Review Letters*, han revelado que dicho estado crítico no solo presenta una viscosidad similar a la de un líquido, sino que incluye una componente muy extraña, denominada «viscosidad de Hall».

Si uno removiera con una cuchara una taza de ese líquido cuántico, comprobaría que este no solo gira, sino que intenta desplazarse también en la dirección perpendicular al movimiento de la cuchara. Si agitáramos este «café cuántico» en el sentido de las agujas del reloj, la presión sobre las paredes del vaso aumentaría, ya que el fluido experimentaría un impulso hacia el exterior. Sin embargo, si removiésemos en sentido contrario, la presión disminuiría, pues el líquido se desplazaría hacia el interior de la taza.

El eco de la gravedad

No obstante, lo más interesante de todo esto es que ese extraño comportamiento relativo a la viscosidad aparece solo cuando permitimos la posibilidad de que el sistema cuántico experimente una anomalía gravitacional. De ser el caso, al medir esta viscosidad estaríamos detectando un efecto indirecto de la gravedad sobre las excitaciones de Weyl.

De hecho, en un artículo publicado el pasado mes de julio en *Nature* junto con otros investigadores, hemos demostrado experimentalmente otra consecuencia de la anomalía gravitacional sobre los fermiones de Weyl de un material topológico: la impronta que dicha anomalía deja en el transporte térmico de los electrones. Esta relación entre anomalías gravitacionales y transporte térmico puede también derivarse, entre otras técnicas, por medio de una correspondencia holográfica.

Hasta ahora hemos desarrollado nuestra teoría de la viscosidad cuántica solo con la ayuda de la dualidad holográfica. La universalidad sugiere que este curioso comportamiento tendría que poder derivarse por medio de cálculos cuánticos tradicionales, algo en lo que estamos trabajando actualmente. También esperamos que nuestra teoría pueda ser comprobada en un futuro próximo mediante experimentos similares a los que hace poco han revelado los efectos de la viscosidad en el grafeno.

—Karl Landsteiner
Instituto de Física Teórica
CSIC y Universidad Autónoma
de Madrid

PARA SABER MÁS

Quantum phase transition between a topological and a trivial semimetal from holography. Karl Landsteiner, Yan Liu y Ya-Wen Sun en *Physical Review Letters*, vol. 116, n.º 8, art. 081602, febrero de 2016.

Odd viscosity in the quantum critical region of a holographic Weyl semimetal. Karl Landsteiner, Yan Liu y Ya-Wen Sun en *Physical Review Letters*, vol. 117, n.º 8, art. 081604, agosto de 2016.

Experimental signatures of the mixed axial-gravitational anomaly in the Weyl semimetal NbP. Johannes Gooth et al. en *Nature*, vol. 547, págs. 324-327, julio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.

Fases cuánticas y teoría de cuerdas. Subir Sachdev en *IyC*, marzo de 2013.

Aislantes topológicos. David Carpentier y Laurent Lévy en *IyC*, agosto de 2015.

Las matemáticas de la literatura

Las grandes obras muestran pautas estadísticas sorprendentemente uniformes

La lectura de un buen libro evoca toda una variedad de sensaciones. Sin embargo, parece ser que casi todas las novelas y obras de teatro ofrecen una de seis «experiencias emocionales» en su recorrido de principio a fin. En un trabajo reciente, un grupo de investigadores de las universidades de Vermont y Adelaida ha analizado la felicidad y la tristeza asociadas a las palabras de más de 1300 obras de ficción; al reconstruir la «trayectoria emocional» de cada una, el equipo halló relativamente pocas variantes (*izquierda*). Otro estudio, coordinado por el Instituto de Física Nuclear de Polonia, encontró que la longitud de las frases en un libro seguía a menudo un patrón fractal (*abajo*).

¿Por qué analizar las propiedades matemáticas de la literatura? Andrew J. Reagan, matemático de la Universidad de Vermont y autor del primer trabajo, señala que, al igual que la ingente cantidad de datos del Proyecto Genoma Humano ha revelado muchísimo sobre los genes, «tal vez los datos nos ayuden a entender mejor los relatos de ficción».

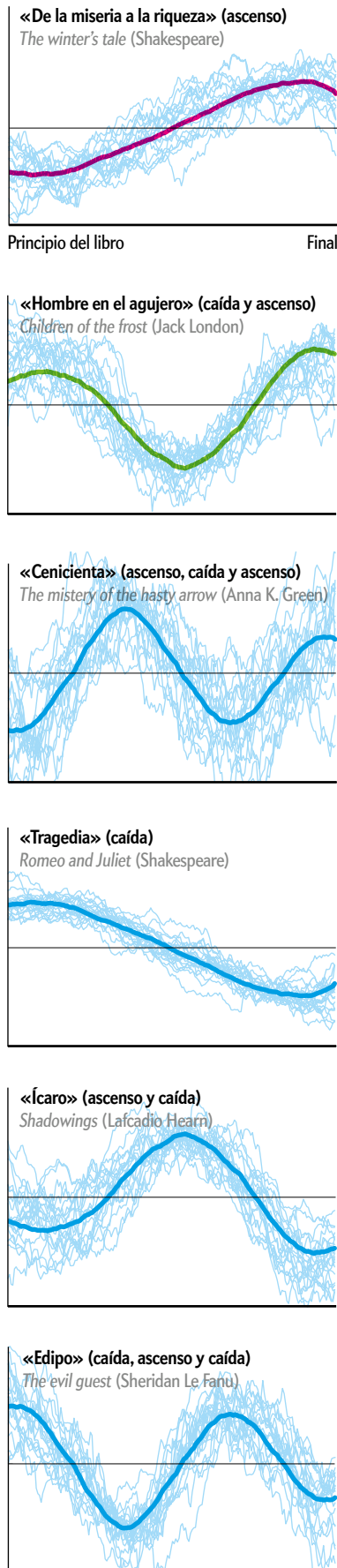
—Mark Fischetti

Cruce

A petición de *Scientific American*, los investigadores de Vermont analizaron dos de las obras consideradas en el estudio sobre fractales (*abajo*) y hallaron que concordaban con dos de las trayectorias emocionales comunes (*curvas de color*). Por ahora, nadie sabe si una curva emocional dada está asociada a un tipo de estructura fractal.

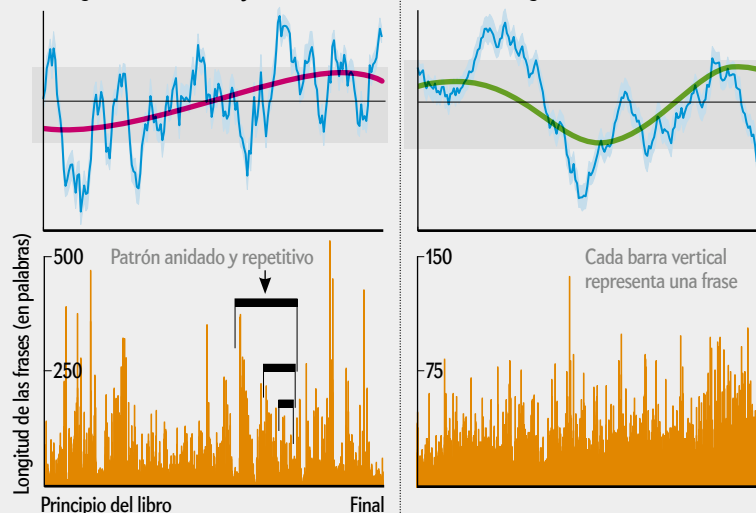
Trayectorias emocionales

Cerca del 85 por ciento de 1327 obras incluidas en el repositorio digital Proyecto Gutenberg siguen una de seis trayectorias emocionales (*curvas gruesas*), definidas a partir de la felicidad o tristeza asociada a las palabras del texto (*líneas finas*). Todos los libros analizados estaban en inglés y tenían menos de 100.000 palabras. Se indican algunos ejemplos.



Finnegans wake (James Joyce)

The waves (Virginia Woolf)



Estructura fractal en las frases

El orden y la longitud de las frases de 113 obras famosas en distintos idiomas ha revelado la existencia de patrones fractales. Los libros caracterizados por un fuerte monólogo interior, como *Finnegans wake*, presentan repeticiones extremas. En textos más tradicionales estas son más moderadas, aunque fractales en ambos casos.

NEUROCIENCIA

LA INTRINCADA RED DE LA MEMORIA

Una revolución técnica arroja luz
sobre el modo en que el encéfalo conecta
los recuerdos, un proceso esencial para
entender y organizar el mundo que nos rodea

Alcino J. Silva



Alcino J. Silva es profesor distinguido y director del Centro Integrador para el Aprendizaje y la Memoria de la Universidad de California en Los Ángeles. En su laboratorio se estudian los mecanismos memorísticos, así como las causas de los trastornos de la memoria y sus posibles tratamientos.



Los recuerdos

dependen de nuestra capacidad para rememorar detalles sobre el mundo: la cara de una niña, una oca, un lago. Pero para convertirlos en experiencias reales, el encéfalo debe fusionar esos elementos y crear un todo integrado: la expresión de esa niña al ver cómo de improviso alzan el vuelo las ocas entre los juncos de la orilla de un lago.

Existen también otros factores responsables del sentido de cohesión de la memoria. A lo largo de milenios, nuestra supervivencia ha dependido no solo del recuerdo de la información adecuada (por ejemplo, un león o una serpiente), sino también de su contexto. ¿Nos tropezamos con ese animal en un paraje solitario de la sabana africana o en el curso de una tranquila visita al zoológico?

Para mantenernos alejados de otro tipo de depredadores en nuestra vida cotidiana, también debemos ser capaces de ubicar nuestros recuerdos en el tiempo: ante una inversión que parece tentadora, tendremos en cuenta quién la ha recomendado para decidir si vale la pena (valoraremos si quien nos la ha sugerido es honrado). Si no se logran conectar ambos aspectos, las consecuencias pueden ser desastrosas. La neurociencia está comenzando a lidiar con la forma en que el encéfalo vincula los recuerdos a través del tiempo y el espacio. Hasta ahora, el grueso de los estudios se había centrado en analizar cómo adquirimos, almacenamos y alteramos cada recuerdo. No obstante, la mayoría de los recuerdos no existen como entidades únicas y separadas, sino que un recuerdo evoca el siguiente, de modo que surgen complejas secuencias de recuerdos que nos ayudan a predecir y comprender mejor el mundo que nos rodea. Después de veinte años de investigación en mi laboratorio y en otros centros, empezamos a vislumbrar los principales mecanismos con los que el encéfalo crea esos recuerdos entrelazados. Entender los procesos físicos encargados de entretejerlos no

dar el tema. El primer gran paso para determinar cómo se entrelazan las ideas lo dimos cuando descubrimos el concepto denominado asignación de recuerdos: nos percatamos de que el encéfalo se sirve de reglas específicas para asignar retazos de información aprendida a distintos grupos de neuronas ubicados en las regiones que participan en la formación de la memoria. La suerte desempeñó un papel esencial en el descubrimiento de la asignación de los recuerdos. Todo comenzó a raíz de una charla con Michael Davies (amigo y compañero ahora en la Universidad Emory) entablada en el curso de una visita a la Universidad Yale en 1998. Davies compartió conmigo los hallazgos de su laboratorio, en el que habían manipulado el gen *CREB* para aumentar la memoria emocional de las ratas (la asociación entre un tono y una descarga eléctrica, por ejemplo). Antes, el equipo de mi laboratorio (ahora sito en la Universidad de California en Los Ángeles, UCLA) y otros investigadores habíamos demostrado que dicho gen era imprescindible para la formación de la memoria a largo plazo. Para llevar a cabo esa tarea, *CREB* codifica una proteína que regula la expresión de

solo aportará más información sobre cómo opera nuestra mente, sino que nos ayudará a prevenir los trastornos de la memoria que alteran nuestra facultad para crear y orquestar ideas.

UN FELIZ ACCIDENTE

Cuando a finales de la década de los noventa iniciamos el estudio de las conexiones entre los recuerdos, carecíamos de los conocimientos básicos y las herramientas precisas para abordar el tema.

EN SÍNTESIS

El estudio de la memoria ha experimentado una revolución gracias a nuevas técnicas que permiten captar imágenes de neuronas concretas e incluso activarlas o inactivarlas a voluntad. Con ellas, experimentos que hace unos años se consideraban ciencia-ficción son hoy posibles.

Las técnicas al alcance de la neurociencia han mostrado que los recuerdos no se asignan al azar a las neuronas de las regiones encargadas del procesamiento y el almacenamiento de la información, sino que existen mecanismos que deciden qué neuronas asentarán cada recuerdo.

La capacidad del encéfalo para controlar las neuronas que codifican cada recuerdo es crucial para consolidar y conectar los recuerdos, facultades que se deterioran en numerosos trastornos neuropsiquiátricos y en el curso del declive cognitivo que comporta la vejez.

otros genes necesarios para la memoria. Durante el aprendizaje se crean o refuerzan algunas sinapsis (los nexos de unión que enlazan las neuronas y hacen posible la comunicación nerviosa) con el fin de facilitar la interacción entre las células. La proteína CREB desempeña la función de arquitecto molecular en este proceso. Sin su concurso, olvidaríamos la mayoría de las experiencias vividas.

Lo que me sorprendió fue que el grupo de Davis logró mejorar la memoria, a pesar de que su laboratorio solo incrementó los niveles de CREB en una fracción de las neuronas del núcleo amigdalino, una región fundamental del cerebro para la memoria emocional. En los meses siguientes a mi visita a Yale, no pude quitarme de la cabeza cómo habían acabado los recuerdos en ese puñado de neuronas que podían aprovechar los niveles más altos de CREB. ¿Cabría la posibilidad de que la proteína no solo se encargase de la formación de la memoria, sino que también se asegurara de que las neuronas provistas de ella tuviesen más probabilidades de participar en el proceso? En nuestras investigaciones sobre CREB, prestamos atención a su función en ciertas regiones del cerebro que sabíamos relacionadas con la memoria: el núcleo amigdalino y el hipocampo; este último almacena un mapa interno de nuestro entorno.

En la ciencia es tan importante plantearse preguntas como dar respuesta a ellas. Gracias a la conversación con Davis, me di cuenta de que los neurocientíficos apenas tienen conocimientos sobre las reglas —si las hubiese— que establecen cómo se asigna un recuerdo concreto a las neuronas de cada una de las regiones encefálicas que procesan y almacenan los recuerdos. Por tanto, decidimos estudiarlo más de cerca.

Nuestro primer gran avance tuvo lugar tras reclutar a la neurocientífica Sheena A. Josselyn, que había estudiado la proteína CREB en el laboratorio de Davis. En una serie de experimentos con animales que realizó en mi laboratorio, y posteriormente junto con otros compañeros en su propio laboratorio de la Universidad de Toronto, Josselyn utilizó un virus para introducir copias adicionales de CREB en neuronas específicas del núcleo amigdalino de los ratones. Con ello, mostró que la probabilidad de que un recuerdo aterrador se almacenase en esas neuronas era casi cuatro veces mayor que de que se guardara en las adyacentes.

En 2007, tras casi una década de esfuerzos, mi laboratorio, en colaboración con el equipo de Josselyn, publicó por fin una prueba de que los recuerdos emocionales no se asignan al azar a las neuronas del núcleo amigdalino, sino que las seleccionadas para almacenar esos recuerdos son las poseedoras de los mayores niveles de proteína CREB. Cabe destacar además los experimentos posteriores, según los cuales CREB ejerce una función similar en otras regiones del cerebro, como el hipocampo y la corteza, su capa más externa.

ENCENDER Y APAGAR LA MEMORIA

Para confirmar el papel de CREB en la asignación de los recuerdos, recurrimos a métodos novedosos que han transformado el estudio de la memoria en los últimos años. Estas técnicas de

laboratorio permiten activar o inactivar neuronas, esto es, evocar o silenciar recuerdos.

Por poner un ejemplo, Yu Zhou, que trabajaba entonces en mi laboratorio, modificó genéticamente un conjunto reducido de neuronas del núcleo amigdalino murino para aumentar sus niveles de CREB y para que expresasen otra proteína diseñada por el laboratorio de Edward Callaway en el Instituto Salk de Estudios Biológicos de La Jolla, California. Gracias a esta ingeniosa proteína de Callaway, podíamos silenciar a voluntad las neuronas con CREB. Cuando inactivábamos aquellas que expresaban con profusión la proteína, mientras las homólogas con niveles bajos se mantenían activas, la memoria emocional quedaba suprimida, lo que demuestra que las neuronas con altos niveles de CREB tienen más probabilidades de almacenar recuerdos.

Sabíamos que los niveles elevados de CREB podían determinar en qué neuronas se almacenaba un determinado recuer-

do, pero desconocíamos el mecanismo exacto. Robert Malenka, de la Universidad Stanford, había descubierto junto con sus compañeros que el aumento de los niveles de CREB en ciertas neuronas facilitaba la activación de estas. ¿Podría el incremento de la excitabilidad ser el motivo por el que las neuronas con niveles altos de CREB eran las elegidas para almacenar los recuerdos?

Para responder a esa incógnita, Zhou modificó las neuronas del núcleo amigdalino a fin de que produjesen más CREB. Y, por medio de microelectrodos diminutos, determinó la facilidad con la que se activaban para medir su excitabilidad. Los resultados confirmaron que las neuronas modificadas se activaban con mayor facilidad que las inalteradas. La elevada excitabilidad (aumento de la predisposición a recibir y transmitir los impulsos eléctricos que conducen la información entre las neuronas) hacía

pensar que dichas células estaban mejor preparadas para iniciar el conjunto de procesos necesario para asentar un recuerdo.

Con el fin de corroborar esa idea, Zhou también examinó las conexiones sinápticas entre las neuronas con más CREB. De acuerdo con un volumen considerable de indicios, el incremento de la fortaleza de las conexiones sinápticas resulta crucial para la formación de recuerdos. Tras entrenar a ratones para que ejecutasen una tarea que evocaba luego recuerdos emocionales, analizó la fortaleza de las conexiones sinápticas de las neuronas amigdalinas con altos niveles de CREB para comprobar si sus conexiones eran más sólidas que las de aquellas que no habían sido modificadas para producir más proteína.

Para ello, estimuló las sinapsis entre esas neuronas aplicando una pequeña corriente eléctrica y registró sus respuestas con electrodos diminutos insertados en ellas. Como era de esperar, las neuronas amigdalinas que poseían mayores niveles de CREB establecían sinapsis más sólidas que las demás, es decir, la probabilidad de que hubiesen almacenado el recuerdo emocional era mayor.

En trabajos aún más recientes, el laboratorio de Josselyn ha demostrado que es posible almacenar el recuerdo de una experiencia aterrador en un conjunto predefinido de neuronas amigdalinas si se las modifica genéticamente para que



MICROSCOPIO colocado en la cabeza de un ratón vivo, que permite examinar la actividad de las neuronas donde se almacenan los recuerdos.

contengan un tipo concreto de canal iónico que aumenta su excitabilidad. Los canales iónicos forman poros en la superficie celular y los elegidos por Josselyn hacían que estas neuronas se activasen con mayor facilidad. De igual modo, el laboratorio del neurocientífico Albert Lee (del Instituto Médico Howard Hughes, en el Campus de Investigación Janelia de Ashburn, Virginia) publicó que con el aumento artificial de la excitabilidad de las neuronas del hipocampo en un lugar determinado mientras los animales corrían por una pista, aumentaba la probabilidad de que esas neuronas respondieran a esa ubicación en la pista; este resultado concordaba con nuestro descubrimiento de que la excitabilidad desempeña un papel fundamental a la hora de determinar qué neuronas participan en el almacenamiento de un recuerdo concreto.

Por último, nuestro grupo, y también el de Josselyn, aprovechó la aparición de una técnica innovadora, denominada optogenética, para activar e inhibir neuronas mediante la luz [véase «Control del cerebro por medio de la luz», por Karl Deisseroth; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2011]. Con ella activamos neuronas concretas que presentaban niveles elevados de CREB. Thomas Rogerson y Balaji Jayaprakash (ambos entonces en mi laboratorio) comenzaron a modificar mediante ingeniería genética las neuronas del núcleo amigdalino para que produjesen más CREB y canalrodopsina2 (ChR2), un canal iónico que se activa con la luz azul. A continuación mostramos que, cuando por medio de la luz activábamos las neuronas amigdalinas provistas de niveles altos de CREB, se desencadenaba en los ratones un recuerdo aterrador, pero no así cuando activábamos aquellas con menos cantidad de proteína, lo que confirmaba que el recuerdo se había almacenado en ellas.

INTERCONEXIONES

En 2009 me pidieron que escribiese un artículo sobre nuestras investigaciones en el ámbito de la memoria, oportunidad que aproveché para dar a conocer nuestras ideas sobre la vinculación de los recuerdos a través del tiempo. La capacidad de la proteína CREB para regular qué neuronas conservan un determinado recuerdo (en otras palabras, la asignación de los recuerdos) me llevó a formular la hipótesis de que este proceso podría resultar fundamental para la capacidad de conectar memorias separadas, lo que en mi laboratorio denominamos ahora la hipótesis de la «asignación para la conexión». Dado que la asignación tiene lugar en la fracción de neuronas con niveles elevados de CREB que se activan con más facilidad, este proceso les permite estar preparadas para almacenar un nuevo recuerdo. Cuando dos recuerdos comparten gran parte de las mismas neuronas, quedan formalmente conectados.

En consecuencia, la activación de esas neuronas al evocar uno de los dos recuerdos desencadena el otro. Otro aspecto clave de la idea fue la predicción de que dos recuerdos formados en poco tiempo (el mismo día) tienen más probabilidades de quedar conectados que los separados por períodos más largos. Si el intervalo es muy superior a un día, el segundo recuerdo ya no se aprovecha de la excitabilidad desatada por el primero, de modo que se almacena en un grupo distinto de neuronas. Tales límites temporales en las conexiones entre recuerdos son lógicos, puesto que es más probable que los sucesos ocurridos a lo largo de un mismo día tengan más relevancia mutua que otros separados por una semana, por ejemplo.

Escribir el artículo y esbozar esas ideas me animó aún más a encarar el reto de cómo probar nuestra hipótesis de la «asignación para la conexión»; la idea era simple, pero no teníamos

nada claro cómo confirmar su legitimidad. Había que esperar a que llegase el momento adecuado para realizar las pruebas.

La situación cambió con la incorporación al proyecto de otros dos miembros de mi laboratorio, Denise J. Cai y Justin Shobe. Cai concibió una idea brillante: con la ayuda de Shobe, introdujo ratones en dos cámaras durante el mismo día, con un intervalo de cinco horas, con la esperanza de que los recuerdos de ambas cámaras quedasen conectados. Más tarde, les propinó pequeñas descargas en las patas mientras permanecían en el segundo recinto. Tal y como esperaban, cuando los depositaron de nuevo en la cámara donde habían recibido la descarga, se quedaron inmóviles, supuestamente al recordar que era allí donde las habían recibido. La inmovilidad constituye una reacción innata al miedo, puesto que la mayoría de los depredadores detectan mejor a sus presas cuando estas se mueven.

El resultado crucial sobrevino cuando Cai y Shobe colocaron los ratones en la cámara neutral. Pensábamos que si los recuerdos de ambas cámaras estaban conectados, al entrar en dicha cámara recordarían que habían recibido una descarga en la otra, de modo que permanecerían inmóviles previendo que sucediera lo mismo; eso fue exactamente lo que descubrimos.

También intuimos que sería menos probable que ambos recuerdos estuviesen conectados si el intervalo de separación era de siete días. De hecho, al exponer de nuevo a los roedores a la cámara neutral después del período más largo, no recordaron la cámara donde habían sufrido la descarga y no permanecieron inmóviles. En general, los recuerdos no se conectan cuando el intervalo que los separa es muy superior a un día.

Estos descubrimientos conductuales resultaron emocionantes, pero no demostraban una predicción clave de la hipótesis: los recuerdos diferenciados formados en lapsos de tiempo muy próximos se almacenan en la misma región cerebral, en poblaciones neuronales superpuestas. Esta superposición física relaciona ambos recuerdos, de modo que al evocar uno viene a la cabeza el otro.

LA VISUALIZACIÓN DE LOS RECUERDOS

Para demostrar de veras la hipótesis de la «asignación para la conexión» tendríamos ni más ni menos que observar los recuerdos mientras se están creando. Ya existen técnicas para obtener imágenes de las neuronas de ratones vivos, pero requieren que la cabeza del murido quede fijada a un gran microscopio, una colocación a todas luces inadecuada para los experimentos conductuales que exigía la demostración de la hipótesis. Me asombra el número de veces en que a lo largo de mi carrera ha surgido la técnica apropiada justo cuando más la necesitábamos. Asistí por casualidad a un seminario en UCLA a cargo de Mark Schnitzer, de la Universidad Stanford, en el que describió un microscopio diminuto que acababa de inventar su laboratorio y que permitía visualizar la actividad de las neuronas de los ratones mientras estos se movían con libertad. El microscopio, de dos o tres gramos de peso, se puede colocar como un sombrero en la cabeza del roedor; era lo que necesitaba para detectar las neuronas activadas por un recuerdo específico. Nos permitió averiguar si esas mismas neuronas se activan unas horas después durante la creación de otro recuerdo, una predicción esencial de la teoría de la asignación para la conexión.

Estábamos tan entusiasmados por lo prometedora que resultaba esa maravillosa invención que decidimos construir nuestra propia versión. Comenzamos a colaborar con los laboratorios de Peyman Golshani y Baljit Khakh, ambos en UCLA, y juntos contratamos a un investigador posdoctoral de talento, Daniel Aha-

roni, que ideó lo que denominamos los miniscopios de UCLA. Nuestros miniscopios, parecidos a los de Schnitzer, disponen de una lente que se puede insertar cerca de las neuronas cuyos datos queremos registrar. El instrumento se monta sobre un soporte que se fija al cráneo para que permanezca estable durante los ejercicios de entrenamiento y las pruebas de memoria. No solo hemos adoptado técnicas de otros investigadores, sino que hemos compartido con gusto las nuestras. Somos firmes defensores del movimiento a favor del código abierto en el ámbito científico, por lo que hemos facilitado nuestros diseños y nuestro *software* para los miniscopios de UCLA a cientos de grupos en todo el mundo.

Para visualizar la actividad de las neuronas con los miniscopios, Cai y su colega Tristan Shuman emplearon una técnica de imagen que modifica genéticamente las neuronas del animal para que emitan fluorescencia cuando aumentan los niveles de calcio en su interior, lo que se conoce como indicador de calcio genéticamente codificado.

Decidimos centrarnos en la región CA1 del hipocampo por el cometido que desempeña en el aprendizaje y en la formación de recuerdos de lugares (tales como las cámaras usadas en nuestros experimentos conductuales). Se introdujo a los ratones provistos de sus miniscopios en las dos cámaras. Queríamos saber si el intervalo de tiempo transcurrido entre la estancia en ambas influiría en las neuronas que se activaban; los resultados superaron nuestras expectativas. En suma, nuestro miniscopio y los experimentos conductuales mostraron que, cuando los ratones conectaban los recuerdos de ambas estancias, muchas de las neuronas de CA1 que se activaban cuando visitaban la primera de ellas, lo hacían también al explorar la segunda. Si el intervalo entre las visitas era de unas cinco horas, creaban dos recuerdos en un agrupamiento similar de neuronas. Cuando el período aumentaba a siete días, no se apreciaba ese patrón de activación superpuesta.

Ese descubrimiento nos llenó de júbilo, puesto que confirmaba una premisa básica de la hipótesis de asignación para la conexión: los recuerdos se entrelazan cuando quedan almacenados en poblaciones neuronales superpuestas. La posterior reactivación de uno de los grupos de neuronas formado para conservar uno de los dos recuerdos estimula el otro y facilita la evocación del segundo.

MARCADORES DE RECUERDOS

A fin de corroborar los resultados del miniscopio, Cai recurrió a otro método ideado por el neurocientífico Mark Mayford, que trabaja ahora en la Universidad de California en San Diego. La técnica de Mayford es conocida como sistema TetTag, acrónimo de marcador (*tag*) de tetraciclina. Cuando la visita del ratón transgénico a una cámara genera un recuerdo, TetTag señala las neuronas activadas con un marcador fluorescente que permanece intacto durante semanas.

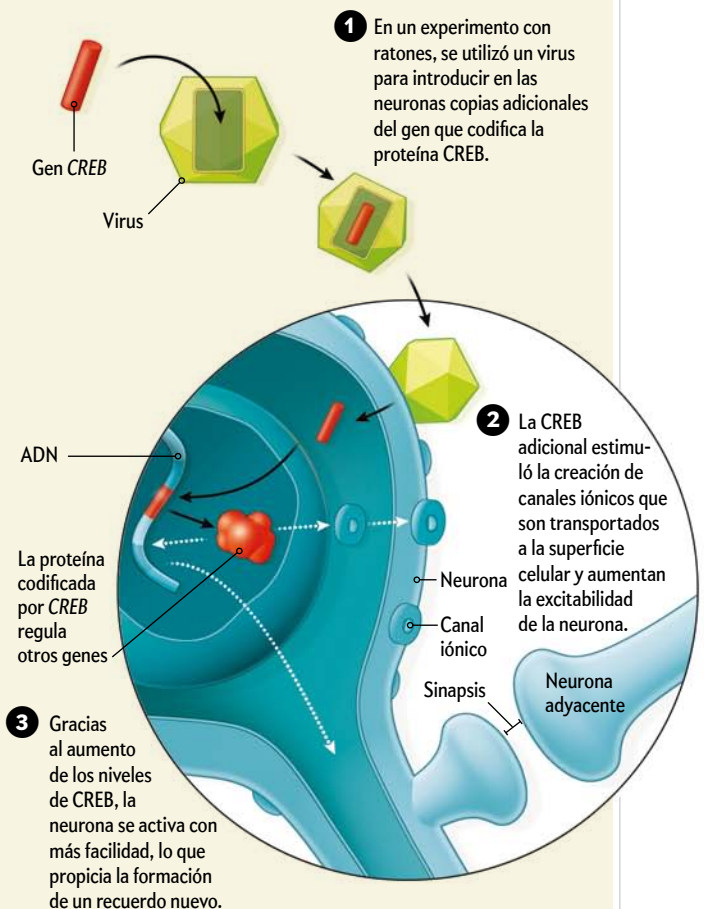
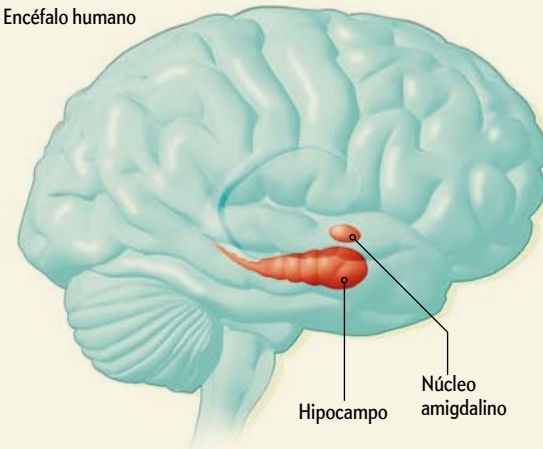
Posteriormente, en los estudios *post mortem* de los roedores se comparan las neuronas activadas recientemente (identificadas por genes expresados justo después de la formación de los recuerdos) con las señaladas por el marcador permanente. Así no solo se detectan las neuronas activadas por un acontecimiento concreto (en cuyo caso, la neurona contará con un solo marcador fluorescente), sino también las activadas por dos hechos, que quedan iluminadas por ambos marcadores.

Cai y su equipo usaron en el experimento la misma configuración que habían empleado antes y mostraron que, durante el intervalo corto de cinco horas, la superposición entre

Fabricantes de recuerdos

Ciertas regiones del cerebro son cruciales para la creación de los recuerdos. El núcleo amigdalino resulta esencial para los recuerdos con contenido emocional y el hipocampo interviene en la creación de los recuerdos sobre experiencias. Mi laboratorio llevó a cabo un experimento con ratones, según el cual las neuronas en las que habíamos reforzado los niveles de una proteína denominada CREB tenían más probabilidades de codificar un recuerdo.

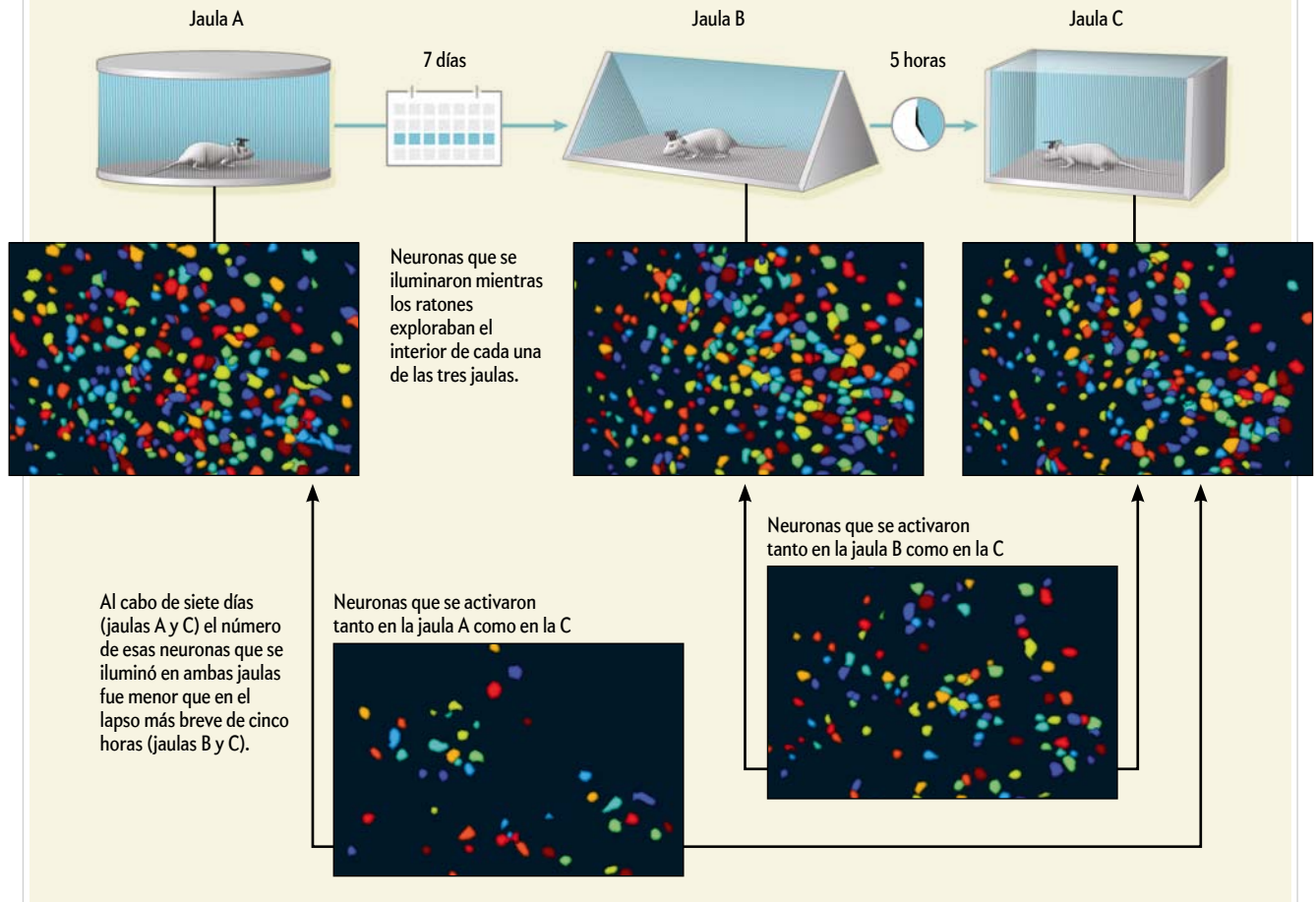
Encéfalo humano



La magdalena de Proust

La evocación de recuerdos ligados en el tiempo (el efecto de la «magdalena de Proust») empieza a comprenderse en el plano neuronal. Los experimentos revelan que un ratón expuesto a dos jaulas (B y C) las vincula en su memoria si ha pasado por ambos recintos en un intervalo de cinco horas. En cambio, no vincula

los recuerdos de las jaulas A y C cuando el intervalo es de siete días. La conexión de los recuerdos de B y C se establece porque muchas de las neuronas donde se almacenan los recuerdos de ambas jaulas se activan al mismo tiempo, a diferencia de lo que sucede con A y C.



las neuronas que codifican cada uno de los dos recuerdos con marcadores dobles era más elevada de lo que se esperaba por efecto del azar. En cambio, con el intervalo de siete días, la superposición entre las dos experiencias no se encontraba por encima del nivel de azar.

Otros experimentos realizados por el equipo de Josselyn en Toronto aportaron nuevas pruebas de la validez de nuestra hipótesis sobre las conexiones entre los recuerdos. Este grupo no solo llevó a cabo una versión distinta del experimento de los marcadores neuronales, sino que también halló una prueba conductual independiente sobre las conexiones. Los investigadores de Toronto argumentaron que, si había superposición entre las poblaciones neuronales que codificaban dos recuerdos, el aumento de los niveles de CREB desencadenado por el primer recuerdo también fortalecería el segundo. Sin embargo, en lugar de exponer a los ratones a lugares diferentes, tal y como habíamos hecho nosotros, el equipo de Josselyn los entrenó para que reconociesen dos tonos distintos. El aprendizaje del primero

reforzaba el recuerdo de un segundo tono si ambas sesiones de entrenamiento habían tenido lugar en el plazo de seis horas, pero no si habían transcurrido entre 6 y 24.

Hace poco, Kaoru Inokuchi y sus colaboradores en la Universidad de Toyama dieron un paso más en este análisis. Mediante técnicas de optogenética, inactivaron el grupo de neuronas compartido por dos recuerdos emocionales distintos sin alterar las demás células, incluidas las relacionadas únicamente con uno de los recuerdos. Demostraron que con la inactivación de las neuronas compartidas era posible romper la conexión entre ambos recuerdos sin afectar a la capacidad de recordar cada uno por separado. Este elegante experimento aportó una prueba directa de que las neuronas compartidas por dos recuerdos resultan cruciales para la conexión entre ellos. Con este experimento, pasaron a formar parte del grupo de laboratorios que han aportado demostraciones independientes de nuestra hipótesis incipiente sobre la asignación para la conexión.

MEJORA DE LA MEMORIA DURANTE EL ENVEJECIMIENTO

A continuación, decidimos estudiar la conexión entre los recuerdos en ratones más viejos. En comparación con los jóvenes, los roedores maduros presentan niveles inferiores de CREB en el encéfalo, también en las neuronas de la región CA1 del hipocampo, por lo que la excitabilidad es menor. Con esta idea en mente, predecimos que los ratones que estaban envejeciendo tendrían dificultades para conectar los recuerdos. Por tanto, Cai y sus colaboradores decidieron repetir, esta vez con animales viejos, muchos de los experimentos que ya habíamos completado, cuyos resultados nos sorprendieron. Los científicos experimentados saben que las hipótesis son meras herramientas. No teníamos una fe ciega en nuestra certeza: los fracasos ayudan a reformular las ideas durante el proceso. Pero esta vez nuestra intuición resultó ser atinada.

Todavía recuerdo cuando Cai irrumpió en mi oficina, casi sin aliento. Me contó que los ratones de mediana edad, a pesar de recordar cada una de las cámaras, tenían problemas para conectar los recuerdos, aún cuando la exposición tenía lugar con cinco horas de diferencia (un plazo que no presentaba dificultades para los más jóvenes). A diferencia de lo observado con los adultos jóvenes, las imágenes de los ratones más viejos captadas con el miniscopio no revelaron la superposición entre los recuerdos almacenados. Emocionados como estábamos, seguíamos en cambio siendo escépticos, así que volvimos a repetir los experimentos. La segunda vez, el resultado fue aún más convincente. Las neuronas de los ratones de mediana edad con niveles más bajos de CREB no conectaban los recuerdos con tanta facilidad como las de los ratones jóvenes.

Estos resultados nos animaron a ensanchar el objeto de nuestra investigación. ¿Podríamos aumentar artificialmente la excitabilidad de un grupo de neuronas de CA1 justo cuando los ratones más viejos exploraban ambas cámaras para garantizar que algunas de las neuronas de CA1 activadas en una cámara se activasen también cuando los roedores pasaran a la siguiente?


Para lograrlo, recurrimos a una técnica innovadora que, mediante ingeniería genética, coloca sobre la superficie celular receptores que controlan el funcionamiento de la célula. La técnica se conoce como DREADD, acrónimo que significa «receptores de diseño activados exclusivamente por fármacos de diseño». La activación de los receptores de DREADD nos permitía activar el mismo grupo de neuronas de CA1 mientras los animales exploraban ambas cámaras, de modo que se formaba una conexión entre los recuerdos de los dos recintos.

Debo confesar que de buen principio la idea de este experimento me pareció absurda, pues existe toda una serie de razones por las que podría haber fracasado. En primer lugar, en los recuerdos de lugares participan millones de neuronas dispersas por múltiples regiones interconectadas, no solo de la región CA1. El envejecimiento podría haber afectado a los procesos de interconexión de recuerdos en muchas de esas áreas, incluso en todas. Por tanto, aunque lográsemos aumentar la excitabilidad de un subgrupo de neuronas de CA1, podría suceder que no fuesen las adecuadas; es más, quizá no estuviésemos induciendo los niveles apropiados de excitabilidad. Así y todo, el experimento funcionó. La clave de este tipo de experimentos un tanto inciertos radica en mantener el equilibrio entre la inversión de tiempo y de dinero y los beneficios que pueden resultar. Aunque en este caso puedo afirmar con rotundidad que la suerte se alió con nosotros. Al restablecer el aumento de la excitabilidad

de un subgrupo específico de neuronas de CA1 en ratones de mediana edad, logramos asignar estos dos recuerdos a muchas de las mismas neuronas de CA1 y, en consecuencia, recuperar la conexión entre recuerdos en tales ratones.

Las investigaciones de otros laboratorios, tanto con animales como con humanos, también han revelado cómo se entrelaza un recuerdo con otro. Howard Eichenbaum, de la Universidad de Boston, demostró que las ratas son capaces de encontrar conexiones entre los recuerdos que comparten contenido. Por su parte, la neurocientífica Alison Preston, de la Universidad de Texas en Austin, demostró junto con sus colaboradores que, cuando los recuerdos comparten contenido, los humanos pueden conectarlos con mayor facilidad. Al recordar uno posiblemente nos venga a la cabeza el otro.

Gracias al creciente arsenal de herramientas a nuestra disposición para medir y controlar la actividad neural, estamos comenzando a desentrañar los mecanismos mediante los que el encéfalo organiza la información. Actualmente, nuestro equipo está tratando de ampliar ese trabajo y abrir nuevas vías. Junto con Panayioti Poirazi, neurocientífica del Instituto de Biología Molecular y Biotecnología de la Fundación Hellas para la Investigación y la Tecnología, en Grecia, estamos construyendo modelos informáticos para simular cómo y cuándo se conectan los recuerdos. También estamos tratando de descubrir los mecanismos que controlan los intervalos de tiempo necesarios para la conexión entre recuerdos en distintas estructuras del encéfalo.

Hasta ahora, una gran variedad de experimentos llevados a cabo por distintos laboratorios respalda firmemente la hipótesis de la asignación para la conexión. Esperamos que entender cómo se entretrejen los recuerdos nos ayude a desarrollar tratamientos para problemas de memoria frecuentes en un amplio espectro de enfermedades psiquiátricas, desde el deterioro cognitivo asociado al envejecimiento hasta la esquizofrenia, la depresión o el trastorno bipolar. Aparte de las implicaciones clínicas, los estudios que hemos descrito reflejan el comienzo de una nueva y fascinante era en el ámbito de la investigación sobre la memoria, en la que los experimentos ya no estarán limitados por las herramientas disponibles, sino por el alcance de nuestra imaginación. 

PARA SABER MÁS

Synaptic tagging during memory allocation. Thomas Rogerson et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 15, n.º 3, págs. 157-169, marzo de 2014.

Memory integration: Neural mechanisms and implications for behavior. Margaret L. Schlichting y Alison R. Preston en *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 1, págs. 1-8, febrero de 2015.

Finding the engram. Sheena A. Josselyn et al. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 16, n.º 9, págs. 521-534, septiembre de 2015.

A shared neural ensemble links distinct contextual memories encoded close in time. Denise J. Cai et al. en *Nature*, vol. 534, págs. 115-118, 2 de junio de 2016.

Competition between engrams influences fear memory formation and recall. Asim J. Rashid et al. en *Science*, vol. 353, págs. 383-387, 22 de julio de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fijación de la memoria. R. Douglas Fields en *JyC*, abril de 2005.

El archivo de la memoria. Rodrigo Quian Quiroga, Itzhak Fried y Christof Koch en *JyC*, abril de 2013.

El largo camino hacia el recuerdo. Christof Kuhbandner en *MyC* n.º 81, 2016.

AGRICULTURA

Xylella fastidiosa, la bacteria que

VIEJOS OLIVOS DEL SUR DE ITALIA con gran parte de las ramas cortadas por los gestores forestales, en un vano intento por detener la propagación de la virulenta bacteria.



arrasa los olivares



Un prolongado trabajo de análisis ha demostrado que la bacteria es la causa de la enfermedad que está devastando los olivos en el sur de Italia

Enrico Bucci

A principios de 2017, la Comisión de Investigación de la Academia Nacional de los Linceas, órgano asesor de las autoridades públicas italianas, me pidió que me ocupara de un problema particular: evaluar si había datos suficientes para demostrar de manera fehaciente la correlación entre la infección por la bacteria *Xylella fastidiosa* y los síntomas observados en los olivos de Apulia, en el sur de Italia, lo que se conoce como síndrome de desecación rápida del olivo.

No es que la Academia no hubiese expresado con claridad su punto de vista sobre el tema: según los académicos, los datos disponibles a mediados de 2016 daban indicaciones ya muy claras; tanto como para inducir a esta institución a publicar un informe dedicado a *Xylella*, con la esperanza de despejar las dudas sobre cuál era la posición de la comunidad científica con respecto a este problema.

EN SÍNTESIS

A principios de 2017, la Comisión de Investigación de la Academia Nacional de los Linceas, en Italia, pidió al autor que evaluara si había datos suficientes para demostrar de manera fehaciente la correlación entre la infección causada por la bacteria *Xylella fastidiosa* en olivos de la región italiana de Apulia y la presencia de síntomas del síndrome de desecación rápida del olivo.

El estudio incluyó más de 5000 muestras de olivo recogidas desde principios de 2015 hasta finales de 2016, que se habían analizado para detectar la bacteria. Además, a fin de establecer una posible relación de causalidad, se inyectó la bacteria a olivos de una variedad conocida por su vulnerabilidad a la infección.

Los resultados demostraron que existe una correlación entre *Xylella fastidiosa* y el síndrome de desecación rápida, y que la bacteria no es una simple oportunista, sino la causa de la enfermedad.

Ese informe fue el resultado de un trabajo meticuloso de análisis elaborado a partir de numerosas entrevistas con los investigadores que se ocupaban del problema, visitas a los respectivos laboratorios e inspecciones de diversos tipos; y, para un mayor equilibrio, también incluyó visitas y entrevistas a quienes habían expresado dudas sobre la importancia de la asociación entre la bacteria y la enfermedad y habían indicado otras posibles causas. A pesar de la ardua tarea, solo sirvió para apaciguar, en parte, la inquietud de los que se oponían a la asociación entre la bacteria y la desecación. En particular, algunos (entre los que me incluyo) lamentamos la falta de análisis de un número lo suficientemente grande de muestras como para disipar cualquier incertidumbre. Otros consideraron que la tipología de los datos disponibles no era la adecuada para demostrar con certeza la relación entre la presencia de *X. fastidiosa* y el síndrome de desecación, a pesar de las afirmaciones de quienes habían tratado el tema más profundamente.

Con un sentido de la responsabilidad digno de admiración, derivado de su propia misión en el país, la Comisión de Investigación de la Academia decidió responder a las críticas y realizó lo que las normas de la ciencia abierta prevén: pidió que el problema fuese examinado por uno de sus críticos que, por otra parte, no tuviese ningún conflicto de interés por alguna relación con investigadores de la Apulia o con cualquier persona que hubiese trabajado previamente con *Xylella*. Acepté el encargo con entusiasmo, y lo que sigue es el relato de lo que he averiguado junto con la mencionada Comisión.

ESTABLECER UNA CORRELACIÓN

El concepto de correlación entre la presencia de una determinada bacteria y la de una enfermedad concreta, ya sea en plantas o en otros organismos, es engañosamente simple [véase «Correlación no implica causalidad», por Bartolo Luque; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2016]. El sentido común nos llevaría a pensar, por ejemplo, que si al analizar en serie cientos de olivos que contuvieran *X. fastidiosa*, siempre o casi siempre encontráramos síntomas de desecación, entonces el síndrome podría relacionarse con la presencia de la bacteria.

En realidad, es fácil demostrar que no es así: al continuar nuestras mediciones podríamos descubrir que olivos no infectados por *Xylella* también muestran síntomas de desecación; en estas condiciones (síntomas presentes tanto en los olivos infectados como en los no infectados) sería evidente que la bacteria no influye en el desarrollo de la enfermedad.

Para establecer la correlación, por tanto, necesitamos primero dos series de datos sobre la presencia o ausencia de síntomas: una relativa a los olivos infectados y otra que se refiera a los olivos sin la bacteria. Si la correlación existe, esperaremos encontrar con mucha más frecuencia síntomas en los olivos portadores de la bacteria que en el grupo de los que no la tienen. Si se verifica esta hipótesis, puede concluirse que, cuando la bacteria está presente, hay enfermedad. Pero si la bacteria no fuese el principal agente relacionado con la patología, sino solo uno entre otros más importantes, podríamos todavía descubrir que la bacteria no está presente en la mayoría de los olivos afectados de desecación; es decir, podría estar asociada al síndrome, pero no ser el factor más frecuente. Podría suceder que en la gran mayoría de los olivos infectados hubiera un hongo, también relacionado con la desecación, mientras que la bacteria se presentara solo en una pequeña parte de los olivos secos.

Por consiguiente, necesitamos cambiar nuestro modo de proceder. Partiendo de cierta cantidad de olivos cuyos síntomas

Enrico Bucci es profesor de la Universidad de Temple en Filadelfia, donde trabaja en biología de sistemas complejos en la Organización de Investigación de Salud Sbarro. Sus intereses se centran en el análisis de datos biomédicos a gran escala, relativos tanto a la biología cuantitativa como a la integridad de la investigación científica.



conocemos (sanos o secos en diversos grados) podemos tratar de detectar en ellos la bacteria. Si esta constituye un factor importante relacionado con la enfermedad, esperaremos que se encuentre con frecuencia en los olivos secos, y, por el contrario, tenga poca presencia en aquellos sin síntomas aparentes.

En resumen, para determinar si un patógeno es un factor relevante en el desarrollo de la desecación, habrá que comprobar si en los olivos infectados los síntomas se observan con frecuencia; si en los olivos no infectados las manifestaciones de los síntomas son escasas; si en presencia de síntomas se identifica la bacteria con frecuencia; y si en ausencia de síntomas la bacteria es poco común.

DATOS DISPONIBLES

Muchos de los documentos publicados sobre la cuestión contienen datos generales relativos a muestreos extensos de olivos, con indicación del número total de olivos sintomáticos, asintomáticos, infectados por *Xylella* o sin la bacteria.

En el documento «Final report of an audit carried out in Italy from 8 June 2015 to 19 June 2015 in order to evaluate the situation and the official controls for *Xylella*» (Informe final de una auditoría llevada a cabo en Italia desde el 8 al 19 de junio de 2015 con el fin de evaluar la situación y los controles oficiales de *Xylella*), publicado por la Unión Europea, se informa de 562 olivos que dieron positivo a la bacteria. Pero ¿cuántos de esos árboles presentaban síntomas? No es posible saberlo a partir de los datos recopilados en el documento; por lo tanto, no puede averiguarse con ellos si existe o no una correlación entre la desecación y la bacteria (ni siquiera cuál es la prevalencia global de la infección, dado que las muestras se recogieron en zonas geográficas limitadas y, en términos generales, exentas de la infección y la desecación de los olivos). En el documento citado, los datos se analizan con otro propósito: como indica el título del informe, se trata de evaluar la situación en el territorio y la idoneidad de las medidas adoptadas para contener la infección, dado que la bacteria se considera un organismo peligroso.

A pesar de que, por los motivos mencionados, gran parte de los documentos y datos de trazabilidad no tengan ninguna utilidad para confirmar la correlación, existen datos públicos que vale la pena considerar. Se trata de la base de datos de la región de Apulia, disponible en Internet (www.emergenzaXylella.it), que contiene los resultados de los análisis moleculares destinados a detectar la presencia de *Xylella* en miles de muestras de olivos. Los datos proceden de una red de laboratorios que en este momento realiza el seguimiento de la bacteria: la red SELGE (Servicios y Tecnologías Innovadoras para el Sector Agroalimentario), así como laboratorios del Consejo Nacional



ALGUNOS DE LOS 500 ÁRBOLES muestreados por los investigadores de Bari para evaluar la presencia de *Xylella* en olivos con síntomas de desecación rápida. Las plantas, con síntomas evidentes y extensos de sufrimiento, se encuentran en municipios de la zona del Salento, que se sabe que han sido colonizados por *Xylella* desde hace al menos dos años.

de Investigación de Italia (CNR) y la Universidad de Bari, relacionados con dicha red.

Además de incluir información general sobre cada muestra, como la fecha de muestreo, las coordenadas de la planta de origen, un código de identificación del grupo de técnicos que obtuvo la muestra y algún otro detalle, se informa de los resultados de tres pruebas moleculares independientes realizadas para detectar la bacteria, y se indica la presencia o ausencia de síntomas en la planta.

Lamentablemente, la página web en cuestión no expone los datos en una forma fácilmente utilizable, sino en archivos escaneados en formato PDF: corresponden a las tablas producidas a medida que se hacía el muestreo, con el sello y la firma del funcionario responsable, tal vez con el fin de demostrar burocráticamente la ejecución del muestreo. Por suerte, a veces la tecnología puede superar la burocracia: los archivos PDF se sometieron a un procedimiento de reconocimiento óptico de carac-

teres para recuperar los datos indispensables, y los inevitables errores se corrigieron manualmente. De esta manera, se obtuvo información sobre 5422 muestras de olivo recogidas por unos 200 técnicos desde principios de 2015 hasta finales de 2016. Las muestras se habían sometido a 10.844 pruebas de detección del ADN de *Xylella* (mediante la reacción en cadena de la polimerasa, o PCR) y a 5338 ensayos con anticuerpos para la identificación independiente del patógeno (los llamados ensayos ELISA). Todo ello supuso un trabajo inmenso, puesto que se indagó si la bacteria se hallaba presente en cada muestra casi siempre con los tres ensayos moleculares (uno de ELISA y dos de PCR).

A partir de esos datos, junto con la Comisión de Investigación comprobamos lo que ya había afirmado con certeza hace un año la Academia Nacional de los Linceos y el resto de la comunidad científica competente en este tema: *Xylella* estaba relacionada con el síndrome de desecación que está asolando los olivares del Salento (en la región de Apulia) y avanza paulatinamente hacia el norte.

LOS RESULTADOS

El primer resultado parecía ya evidente con una mirada rápida de los datos: unos cuatro árboles de cada cinco en los que se detecta *Xylella* presentan signos de desecación; al contrario, en ausencia de la bacteria, solo un olivo de cada cinco muestra síntomas. Esto se cumple tanto si el patógeno se identificó con el análisis de su ADN como por el de sus anticuerpos (en la gran mayoría de los casos, los resultados de los dos tipos de pruebas

El fracaso de la contención de *Xylella* en Italia

Una auditoría de la Comisión Europea encuentra fallos repetidos en la prevención de la plaga que devasta los olivos en el país

ALISON ABBOTT

El patógeno virulento que está destruyendo olivares históricos en la región de Apulia, en el sur de Italia, está avanzando hacia el norte y amenaza con alcanzar el resto de Europa. El año pasado las autoridades italianas no lograron seguir el curso de la plaga y no se ajustaron a los planes de contención acordados con la Comisión Europea, según una auditoría publicada el pasado 31 de mayo por ese organismo.

Los científicos de la región no están sorprendidos por esa crítica: sus esfuerzos para frenar la infección han chocado repetidamente con obstáculos durante los últimos cuatro años, desde que sospecharon por primera vez que la enfermedad estaba causada por la bacteria *Xylella fastidiosa*.

«La situación es ridícula», afirma el fitopatólogo Giovanni Martelli, de la Universidad de Bari, en el norte de la región de Apulia. «Las autoridades han tardado demasiado en responder, cuando lo que se necesitaba era una acción rápida», añade.

El patógeno, para el que no hay tratamiento, nunca se había visto en Europa antes de que fuese detectado en Apulia en 2013. Probablemente llegó del continente americano, donde es endémico. Los investigadores establecieron que dicha bacteria estaba causando el síndrome de desecación rápida del olivo en Apulia, pero sus hallazgos fueron cuestionados. Hasta el punto de que, en 2015, un fiscal inducido por unos ecologistas enojados que protestaban por la tala de olivos antiguos abrió una investigación penal para determinar si los investigadores habían causado ellos mismos la infección.

La auditoría de la Comisión incluye una retahíla de fracasos por parte de las autoridades italianas. Argumenta que el seguimiento sistemático de la infección comenzó demasiado tarde y que algunos árboles infectados se arrancaron con un «retraso excesivo». El informe señala también que las autoridades nacionales y regionales han desembolsado poco más de la mitad de los 10 millones de euros presupuestados para

medidas de contención. Los datos obtenidos por la revista *Nature* proporcionan más pruebas de una respuesta lenta. Durante la mayor parte de 2016, los laboratorios italianos apenas procesaron muestras de *Xylella*, lo que indica que el seguimiento casi había cesado. Las autoridades no respondieron a las solicitudes de explicaciones.

La Comisión está preocupada ante la posibilidad de que *X. fastidiosa pauca*, la subespecie que ahora se sabe que causa el síndrome de desecación, sea una amenaza para toda la industria olivarera de Europa si no se frena su avance. Pero las preocupaciones de la Comisión también van más allá. Los nuevos programas de seguimiento que coordina ahora han identificado algunas otras subespecies de *Xylella* en otros países de la Unión Europea. En mayo, las autoridades españolas también informaron de que la muy temida *X. fastidiosa fastidiosa*, la causa de la enfermedad de Pierce, que aniquila periódicamente los viñedos de California, se había detectado en una vid en la isla de Mallorca. Esa infección fue fácilmente contenida, pero a los científicos les preocupa que otras subespecies aún por descubrir puedan originar epidemias en otros cultivos.

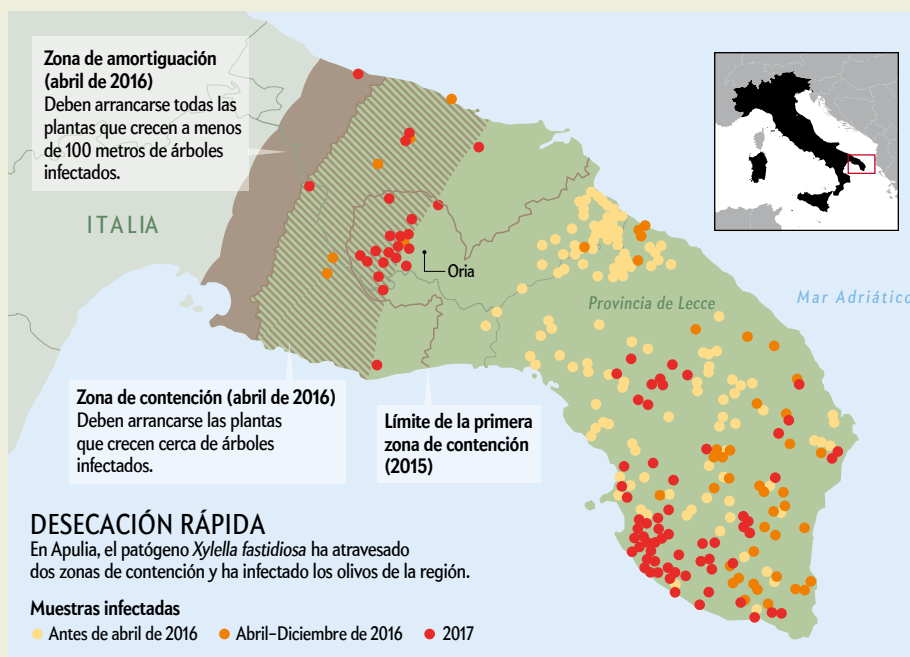
Tragedia italiana

La pequeña ciudad de Oria ejemplifica la lucha para controlar la destrucción que sacude los olivares del sur de Italia. Allí, hace dos años, unos ecologistas se encadenaron a árboles antiguos para impedir que fueran arrancados. Lograron una victoria pírrica: los árboles en toda aquella zona están ahora muriéndose y *Xylella* ha sido declarada endémica en el lugar.

Los disturbios de Oria comenzaron después de que Italia declarara el estado de emergencia para la enfermedad a principios de 2015 y nombrara a un general de la policía militar, Giuseppe Silletti, para que introdujera medidas de contención drásticas, como la tala de árboles sanos alrededor de los infectados. Siguiendo las normas de la UE, Silletti elaboró un mapa de las zonas infectadas en el que se marcaba una zona

de amortiguación de 20 kilómetros que estaba casi libre de la infección, donde las autoridades debían hacer un seguimiento especialmente cuidadoso de los árboles. Oria, que se convirtió en el centro de las actividades de protesta, estaba cerca del límite norte de aquella zona. La fiscalía de Apulia ordenó suspender la destrucción de árboles en la región mientras continuaba su investigación. Silletti dimitió en diciembre de 2015, aduciendo que su capacidad para implementar el plan de contención había sido bloqueada a cada paso. La fiscalía no levantó su prohibición hasta julio de 2016, después de que la Comisión amenazara con denunciar a Italia ante el Tribunal de Justicia de la Unión Europea.

Los esfuerzos para detener la infección han chocado con otros obstáculos. A principios de 2016, el gobernador de Apulia, Michele Emiliano, anunció que un grupo de trabajo reemplazaría a las fuerzas de emergencia de Silletti, pero su composición y mandato exactos nunca se han



hecho públicos. En abril, la Comisión definió una nueva zona de contención, más al norte, que inicialmente se hallaba libre de la infección, dando por perdido el extremo más meridional de Apulia (donde se incluye Oria), que se consideraba zona de infección endémica de *Xylella*. Sin embargo, como señalaron los auditores de la Comisión después de su visita a Apulia en noviembre de 2016, el seguimiento sistemático de los olivos no se había iniciado hasta finales de agosto de ese mismo año, y esa inactividad aumentó el riesgo de propagación de la infección, según su informe. Los resultados del seguimiento intensivo realizado a finales de 2016 han revelado ahora que casi 900 muestras de plantas de la nueva zona de contención eran positivas a *Xylella*, según un subconjunto de datos hecho público.

La Comisión ha invertido cerca de 10 millones de euros en programas internacionales de investigación para estudiar *Xylella*, pero la región de Apulia no ha cumplido aún su compromiso de apoyar la investigación local. En septiembre de 2016 anunció proyectos por valor de 2,5 millones de euros, tras la convocatoria de un concurso de subvenciones el año anterior, pero los científicos que participaban aún no han recibido el dinero.

Algunos detractores todavía no creen que *Xylella* esté causando el síndrome de desecación. La investigación del fiscal sobre los científicos de Apulia se iba a cerrar el pasado julio si no había una acusación contra ellos. A mediados de mayo, algunos ecologistas enviaron una nueva queja a la fiscalía, objetando que los programas de investigación estaban ignorando injustamente otras posibles causas de la infección, como un hongo (aunque la Comisión ya descartó esa posibilidad).

Mientras tanto, el aumento de vigilancia ha detectado subtipos de *Xylella* en Francia, Alemania, Suiza y en Mallorca, donde el dinámico comercio turístico aumenta el riesgo de propagación de la infección (en el momento de cerrar la edición de este número también se había identificado en Alicante). «Estamos muy preocupados», dice Cinta Calvet, que dirige el programa de protección vegetal sostenible del Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentarias, en Cataluña.

Tal variedad de subespecies sugiere que *Xylella* ha sido introducida en Europa muchas veces, según investigadores de la UE, y puede que aún se detecten más introducciones. Además, ahora está claro que los genes fluyen de manera relativamente fácil entre las diferentes subespecies, afirma Rodrigo Almeida, que estudia *Xylella* en la Universidad de California en Berkeley. Él y su equipo publicaron sus hallazgos el pasado marzo. Dicho flujo genético aumenta el riesgo de que diferentes subespecies se puedan recombinar para originar versiones más patógenas de *Xylella*, lo que será otro motivo para contener urgentemente el brote de Italia.

Hay algunas buenas noticias. Los científicos de Apulia han identificado dos variedades de olivo relativamente resistentes a la enfermedad. El pasado mayo, la Comisión propuso que estos olivos resistentes se planten en áreas infectadas para sustituir a árboles muertos. Pero, según Martelli, el trabajo para desarrollar árboles completamente resistentes podría tomar una década o más.

Alison Abbott es corresponsal de Nature en Europa. Doctora en farmacología, cubre temas de política científica y otras áreas, centradas en la biología.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 546, págs. 193-194, 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de **nature**

coincidieron). La única diferencia reside en una mayor sensibilidad de la PCR, puesto que tiene la capacidad de indicar la presencia o ausencia de la bacteria en un 20 por ciento más de veces (casos en los que ELISA no es concluyente).

¿Por qué uno de cada cinco olivos no exhibe síntomas a pesar de estar infectado? Algunos factores podrían explicar este dato, aunque su relevancia no es segura. En primer lugar, cabe decir que la desecación aparece de promedio transcurrido más de un año desde la infección por la bacteria (cuando esta se halla en cantidad suficiente para obstruir los vasos del xilema del árbol). Una parte de los olivos que dieron positivo al patógeno pero no mostraban síntomas habrían sido muestreados en una etapa temprana de la infección.

Además, incluso las técnicas moleculares más refinadas no están exentas de fallos. En muestras de almendros seguramente no infectados, la PCR indicó erróneamente la presencia de *Xylella* en alrededor del 10 por ciento de los casos. Por último, debe mencionarse un aspecto interesante: parece que algunas variedades de olivo que crecen en los campos de Apulia, como la de leccino, son resistentes a la infección, por lo que los síntomas se manifiestan en mucha menor medida que en otras variedades. Corresponden a portadores sanos, según planteó hace ya tiempo Robert Koch, autor de un famoso conjunto de postulados que deberían cumplirse para poder afirmar la relación entre un patógeno y una enfermedad (en el caso del cólera, por ejemplo). Se trata de organismos resistentes que, a pesar de estar infectados, no desarrollan la enfermedad, en aparente contradicción con el segundo de los postulados en cuestión, que plantea que el patógeno debe estar ausente en individuos sanos.

¿Por qué entonces algunos de los olivos examinados (aproximadamente uno de cada cinco) no presentan *Xylella*, pero sí síntomas? Consideremos que la desecación es un síntoma no específico y que cuando los técnicos encargados del muestreo registran los síntomas, no se limitan a las plantas con desecación rápida, propia del síndrome, sino que a menudo incluyen también las que manifiestan una desecación leve que no necesariamente evolucionará a desecación rápida. También hay que tener en cuenta, una vez más, el error inevitable de las técnicas analíticas empleadas para identificar la bacteria. Además, el muestreo de un olivo con los síntomas no es sencillo. Si el técnico ha recogido la muestra en una zona muerta del árbol, la bacteria puede estar ausente allí. Lo mismo sucede si la muestra se toma en un punto muy distante de los síntomas, aún no colonizado por la bacteria. Y un último aspecto importante: el olivo con síntomas tal vez proceda de una zona algo distante de aquella en la que «aterizó» *Xylella*. Se trata de las zonas de seguimiento, en las que se toman muestras para verificar si la bacteria ha llegado o no. En estos lugares, donde todavía no se observa un aumento repentino y exponencial en el número de olivos secos y muertos, siempre se da la acción de factores desecantes «normales», que de manera constante en el tiempo causan síntomas en árboles que aun así dan negativo a la bacteria.

La presencia de árboles con desecación, incluso leve, pero sin la bacteria en zonas alejadas del centro de la epidemia es normal, y la posible inclusión de muestras de estos olivos en los datos examinados puede justificar la proporción de un olivo de cada cinco con síntomas pero no infectado. Pero ¿y si la muestra procedía de una zona donde ya hacía tiempo que proliferaba la bacteria (y donde era evidente el anómalo aumento exponencial de árboles muertos o moribundos)? La respuesta llegó en abril de 2017 con el muestreo de 500 olivos (de las variedades ogliarola y cellina) en la provincia de Lecce, en 11 municipios en los

que hace al menos dos años que va en aumento el número de plantas con desecación. Dicha zona fue muestreada por el grupo de Giovanni Martelli, de la Universidad de Bari, y por Donato Boscia, del CNR de Bari. El resultado de los análisis de muestras que procedían de una zona que llevaba tiempo infectada y de árboles sintomáticos habría satisfecho al mismo Koch: la bacteria se identificó en el cien por cien de las muestras.

Resumamos: el conjunto de muestras de SELGE, examinado junto con la Comisión de Investigación de la Academia de los Linceos, afectado por errores inevitables y «contaminado» por muestras procedentes de zonas no infectadas (a pesar de que contiene olivos sintomáticos, debido a la fisiopatología normal

de esta planta), muestra de nuevo una asociación del 80 por ciento entre la presencia de la bacteria y la de los síntomas, mientras que un 20 por ciento de los olivos sin bacteria son sintomáticos. Sin embargo, si tenemos en cuenta las zonas en las que la bacteria medra ciertamente desde hace tiempo (en el Salento) y donde el aumento de los olivos desecados es innegable, entonces, en todos los olivos desecados se detecta *Xylella*.

EL NEXO DE CAUSALIDAD

Se podría argumentar en este punto que la elevada frecuencia de la bacteria en los olivos sintomáticos es una consecuencia, y no una causa, de la desecación, y que los verdaderos patógenos

Evitar la propagación de *Xylella* en España

Para contener la bacteria, que ya se ha detectado en las Baleares y en Alicante, debe incidirse en los insectos que la transmiten, de los que todavía se conoce muy poco

ALBERTO FERERES, DANIELE CORNARA Y MARINA MORENTE

La opinión pública sabe que tanto la malaria como el zika son transmitidos por mosquitos, los insectos vectores (que portan y transmiten el patógeno a los humanos) a los que hay que combatir para frenar el avance de estas enfermedades. Sin embargo, la mayoría de la población desconoce cuáles son los vectores de la bacteria *Xylella fastidiosa*, a la que también se ha denominado indebidamente el «ébola del olivo».

En efecto, todos hemos oído que *X. fastidiosa* es una bacteria que causa una enfermedad devastadora que ha arrasado más de 1 millón de olivos en Italia; que, tras haberse identificado el año pasado en las Baleares, en julio se detectó en la península, en concreto, en almendros del municipio de Guadalest, en Alicante (según la información disponible en el momento de escribir estas líneas); y que existen varias subespecies de la bacteria más o menos relacionadas con las especies vegetales a las que atacan. En cambio, poco o nada se dice en los medios sobre cómo se propaga la enfermedad. Incluso no es infrecuente leer afirmaciones equivocadas de que la bacteria es propagada por un «mosquito» o que somos los humanos quienes la transmitimos.

Pero *X. fastidiosa* no se desliza por sí sola. Tampoco los humanos podemos propagarla; todo lo más, podemos hacerlo al mover material vegetal infectado de un lugar a otro. Quien realmente transmite y causa las epidemias en Europa es un grupo de insectos vulgarmente conocidos como cigarrillas, prácticamente desconocidos en nuestro continente hasta hace tres años. Este grupo de insectos es muy común en los cultivos y las zonas forestales de nuestro continente. Sin embargo, debido a que hasta ahora no habían ocasionado problemas gra-

ves, la información disponible sobre su biología, ecología y comportamiento es muy escasa.

Entre las cigarrillas, *Philaenus spumarius* (Hemiptera: Aphrophoridae) es la única con capacidad demostrada para transmitir esta bacteria en Europa. El insecto produce una sola generación al año, está presente en todo el continente y sus formas juveniles, o ninfas, forman unas espumas características en plantas vivaces (de allí su nombre en inglés *spittlebug*, «insecto de saliva»). Tal vez existan otras especies del grupo con la capacidad de transmitir esta bacteria, pero no se ha confirmado. Se desconoce aún cuáles son las características que hacen que estos insectos estén dotados de tal capacidad, pero sí se sabe que los vectores de *X. fastidiosa* tienen un rasgo en común: todos se alimentan de la savia bruta o ascendente (o savia del xilema). Sin embargo, no todos los insectos que se alimentan de xilema transmiten la bacteria.

La bacteria probablemente se introdujo en Europa procedente de Centroamérica, hace más de diez años, con plantas ornamentales. Llegó a varios lugares de clima más o menos templado, donde ha permanecido latente sin que supiéramos nada de ella, hasta que en 2013 se detectó que atacaba a los olivos del sur de Italia. Su rápida expansión en esa región se ha asociado a una elevada población del vector, *P. spumarius*.

En España, se identificó por primera vez *X. fastidiosa* en Baleares a finales de 2016. Muy probablemente ya llevaba años allí infectando a los almendros, a la vista de los síntomas observados en 2008 en árboles que ahora sabemos que han dado positivo a la bacteria. En Baleares también existen poblaciones importantes de

P. spumarius y de otras cigarrillas que podrían estar propagando la enfermedad.

A raíz de la detección de *X. fastidiosa* en Italia, en junio de 2015 el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente aprobó el Plan de Contingencia Español. Sus objetivos principales son, en primer lugar, evitar la introducción de la bacteria en el país y, en el caso de no ser posible, frenar su propagación aplicando el Protocolo Nacional de Prospecciones para la detección precoz de la enfermedad junto con un Programa de Erradicación.

Sin embargo, las medidas de contención adoptadas por las autoridades españolas no tienen en cuenta la presencia del vector en las islas, ya que la Orden APM/21/2017, creada para evitar la propagación de la enfermedad a otros puntos, únicamente prohíbe la exportación desde Baleares de cualquier material vegetal (con exclusión de las semillas) de aquellas especies catalogadas como vulnerables a las diferentes subespecies de *X. fastidiosa*.

Centrarse en el vector, una prioridad

Debido a que aún no se dispone de medidas para curar o «vacunar» a un árbol infectado por *X. fastidiosa*, deberían desarrollarse y adoptarse medidas encaminadas a prevenir y contener la expansión de la plaga. Y es bien sabido por otros patógenos de plantas transmitidos por insectos que una de las maneras más eficaces de frenar las epidemias consiste en limitar las poblaciones del vector. Al igual que las medidas para combatir el zika o la malaria se centran en acciones dirigidas contra los mosquitos que los transmiten, deberíamos tomar medidas similares frente a las cigarrillas.

responsables son otros, mientras que *Xylella* sería simplemente un oportunista que atacaría a las plantas ya debilitadas por un factor diferente. También lo dijo Koch: para comprobar si un patógeno es la causa de una enfermedad, es necesario que, después de ser aislado de los tejidos enfermos e inyectado en un organismo vulnerable, provoque la aparición de los síntomas. Este fue el experimento llevado a cabo, una vez más, por los investigadores de Bari, cuyos resultados fueron presentados por Martelli el pasado 28 de abril en las aulas del Consejo de la Región de Apulia. La bacteria se inyectó en plántulas de olivo de la variedad cellina, conocida por su sensibilidad a la infección y habitual en los campos del Salento. Después de un período de

varios meses se produjo la desecación rápida del olivo, por lo que también en esta ocasión Koch se habría mostrado satisfecho: la bacteria es la causa de la desecación observada en los campos en los que vemos la mortandad de los olivos y en los que la bacteria está presente en un 100 por ciento de las plantas enfermas o moribundas de las variedades vulnerables.

PORTADORES SANOS

Como hemos visto, un factor que explicaría la presencia de la bacteria en los olivos sin síntomas, según se desprende de los datos de SELGE analizados, puede ser la inclusión de muestras de variedades de olivos resistentes. Aunque ya se tenían indi-

De no existir el insecto vector, *X. fastidiosa* no supondría ningún problema para los árboles. A pesar de este conocimiento básico, casi todas las investigaciones y esfuerzos que se llevan a cabo en Europa, y particularmente en España, se están concentrando en la propia bacteria y dedican una escasa atención a sus vectores, que deberían ser realmente el foco de atención.

Existe un gran desconocimiento sobre la biología y el comportamiento de este grupo de insectos en Europa. Esto se pone de manifiesto en la medida que adoptó en 2015 la Comisión Europea de arrancar todas las plantas en un radio de 100 metros alrededor de cada planta infectada por *X. fastidiosa*. Esa decisión se basó en la capacidad de dispersión de *P. spumarius* observada en Ohio, en Estados Unidos, donde se comprobó mediante individuos marcados que la especie conseguía salvar esa distancia desde el punto de liberación en tan solo 24 horas. Sin embargo, en el sur de Europa los cultivos y las condiciones climatológicas son bien diferentes, por lo que esa medida podría ser totalmente equivocada.

Se dispone ya de algunos datos sobre el ciclo biológico de estas cigarrillas y de cuáles son sus fases más vulnerables. Los adultos, que son los que dispersan la bacteria, son difíciles de controlar; además, aún no existen productos que eviten que estos transmitan la bacteria a la planta. La presencia de numerosos adultos daría lugar a una rápida propagación de la enfermedad y provocaría graves daños. Se sabe que los efectos devastadores en los olivos de Italia se debieron a numerosos eventos de infección del mismo árbol provocados por la alta densidad de su vector, *P. spumarius*. En cambio, la fase de ninfa resulta más vulnerable. Una posible estrategia para frenar la plaga consistiría en eliminar las ninfas, fácilmente visibles por la producción de espumas, bien des-



La bacteria *Xylella fastidiosa*, causante de la plaga actual en los olivos y otras plantas, es transmitida por un insecto, la cigarrilla *Philaenus spumarius*. Aunque los adultos (arriba) son difíciles de controlar, las ninfas producen una espuma característica, fácilmente visible (abajo), y resultarían más fáciles de eliminar, lo que ayudaría a contener la plaga.

cando a la bacteria podríamos tener pronto más soluciones para contener la expansión de *Xylella fastidiosa* en nuestro país. Las investigaciones futuras deberían ir encaminadas, por tanto, a conocer mejor al vector o vectores, nuestro verdadero enemigo, sin olvidarnos de otras medidas más a largo plazo dirigidas a obtener variedades de olivo, almendro o viña resistentes a la bacteria.

De no generar pronto esos conocimientos, pondremos en peligro cultivos esenciales para nuestra economía, como el olivo, la vid o el almendro, pero también parques naturales como la Sierra de Tramuntana, en Mallorca, patrimonio de la humanidad, donde ya apareció un olivo infectado. Dicho árbol, que llegó hace tres años procedente de un vivero de otra parte de la isla, parece no haber afectado a los olivos de su alrededor, lo que indicaría que los vectores no están propagando la bacteria en esa zona. Sería muy deseable investigar las causas de esa ausencia de transmisión en tal caso. Quizás ello dé pie al desarrollo de una estrategia que permita combatir de forma eficaz esta temible plaga.

brozando la maleza en el momento oportuno, o bien aplicando algún tratamiento específico.

Otra estrategia radica en la detección precoz de focos de plantas infectadas, una medida esencial en la contención de cualquier epidemia. Sin embargo, los síntomas producidos por *X. fastidiosa* suelen tardar varios meses en aparecer, por lo que la búsqueda de árboles sintomáticos suele ser un proceso poco eficaz. Otra forma de detectar posibles focos corresponde a la detección de insectos portadores de la bacteria. La sola presencia del vector permitiría localizar la presencia de plantas infectadas en una determinada localidad bastante antes de que aparecieran síntomas de la enfermedad. No obstante, esta medida no se está aplicando por falta de conocimiento sobre métodos eficaces para capturar este grupo de insectos.

En conclusión, si se dedicara al vector solo la mitad de los esfuerzos que se están dedi-

Alberto Fereres es profesor de investigación en el Instituto de Ciencias Agrarias del CSIC en Madrid. **Daniele Cornara** y **Marina Morente** son investigadores del mismo instituto. El grupo participa en los proyectos PONTE y XF-ACTORS, que se centran en el estudio de los insectos que transmiten *Xylella fastidiosa*.

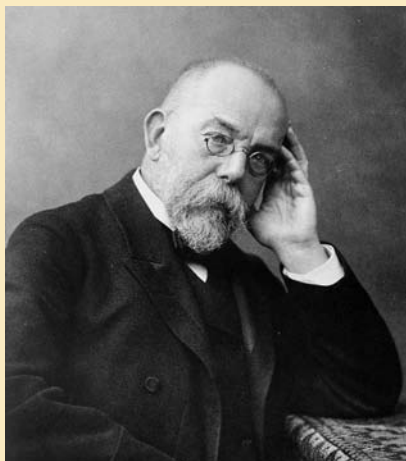
Koch sí, pero con sentido común

El médico y bacteriólogo alemán

Robert Koch, que vivió entre los siglos XIX y XX, es el autor de una famosa serie de postulados, que se presentan a continuación y que deben cumplirse para que podamos hablar de relación entre un patógeno y una enfermedad. Para ser considerado la causa de una enfermedad específica, un agente infeccioso debe:

- Estar presente en todos los casos de la enfermedad.
- Estar ausente en individuos sanos (o en otras enfermedades).
- Poder ser aislado en cultivo puro a partir de tejidos afectados.
- Reproducir la enfermedad si se inocula experimentalmente a un huésped vulnerable.

Sin embargo, de los datos de *Xylella* y los olivos analizados en la Apulia se desprende que:



- Algunos olivos sintomáticos no están infectados, lo que incumple el primer postulado.
- Algunos olivos infectados no muestran síntomas (es decir, la bacteria está presente en árboles aparentemente sanos), lo que incumple el segundo postulado.


En realidad, ya el mismo Koch se dio cuenta de que sus postulados son solo una guía teórica en la identificación de los agentes infecciosos. Por ejemplo, el cólera, una enfermedad a la que el científico alemán dedicó gran parte de su vida profesional, también es transmitido por portadores sanos, lo que contradice el segundo postulado. Es decir, considerar que la verificación absoluta de los postulados de Koch es crucial para establecer la asociación entre un patógeno y una enfermedad es un error metodológico grave.

caciones en este sentido, los nuevos datos obtenidos por los investigadores de Bari lo han confirmado.

En los mismos campos en los que se recogieron las ramitas de los árboles de las variedades ogliarola y cellina, devastadas por *Xylella*, también se tomaron muestras de 100 árboles de la variedad leccino. Mientras que todos los árboles de alrededor, pertenecientes a diversas variedades, eran sintomáticos y como se comprobó, estaban infectados por la bacteria, solo en el 30 por ciento de los de la variedad leccino se detectó la bacteria, y en cantidades menores que en otras variedades. Además, cuando se infectaron experimentalmente con la bacteria plántulas de leccino se tuvo la confirmación: mientras que la variedad cellina mostraba todos los síntomas, la leccino no podía distinguirse de las plantas a las que no se les había inyectado la bacteria. Lo que es cierto para la variedad leccino puede aplicarse también a otras variedades de olivo, y precisamente por ello se están realizando experimentos a gran escala para determinar cuáles son las mejores para hacer frente a la emergencia surgida en la Apulia.

REVISEMOS LA SITUACIÓN

El análisis de las muestras de la red SELGE demostró lo que ya había establecido la comunidad científica y la Academia de los Linceos: existe una relación entre *Xylella* y el síndrome de desecación rápida del olivo. Aunque la desecación es un síntoma ambiguo, cuya causa puede atribuirse a diversos factores, el aumento exponencial del número de olivos desecados en el Salento y su mortandad están vinculados con seguridad a la bacteria. Por tanto, si la pregunta que nos hacemos es cuál es el factor relacionado con la epidemia (y no simplemente qué es lo que está relacionado de manera genérica con la desecación de un olivo), la respuesta, basada en los datos disponibles, es una sola y nada ambigua.

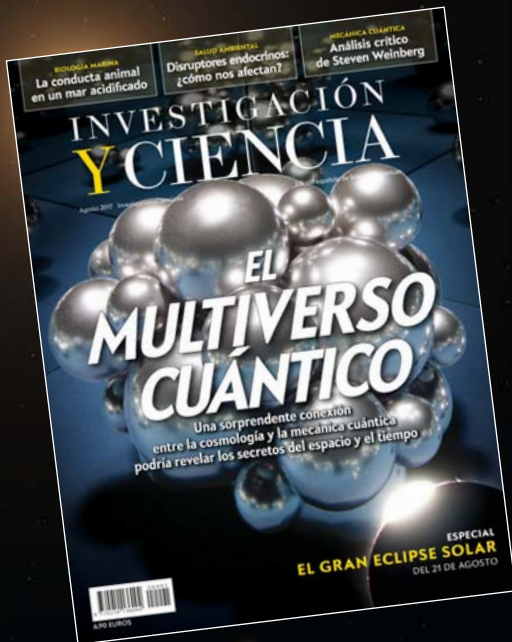
Además, los investigadores de Bari revelaron que la bacteria no es un simple microorganismo oportunista que infecta a los árboles ya debilitados, sino que es la propia causa de la enfermedad. Afortunadamente, las observaciones sobre la existencia de variedades resistentes han sido confirmadas en el campo en un gran número de individuos para la variedad leccino, que también ha mostrado resistencia en las pruebas de patogenicidad. Se están estudiando otras variedades que podrían convertirse en un primer recurso para hacer frente a la terrible bacteria. Mientras se esperan los resultados experimentales, la posibilidad de disponer de otros conjuntos de datos, incluso más numerosos que los de la red SELGE y procedentes del seguimiento fitosanitario, podría contribuir a la identificación de otros cultivares más resistentes y también proporcionar más información relevante. 

© Le Scienze

PARA SABER MÁS

- High throughput PCR detection of *Xylella fastidiosa* directly from almond tissues.** J. Chen y E. L. Civerolo en *Journal of Microbiological Methods*, vol. 73, n.º 1, págs. 57-61, 2008.
- Pilot project on *Xylella fastidiosa* to reduce risk assessment uncertainties.** M. Saponari et al en *EFSA Supporting Publications*, vol. 13, n.º 3, marzo de 2016.
- Informe *Xylella*.** Grupo de trabajo de la Academia Nacional de los Linceos, Roma, 2016.
- Susceptibility of *Olea europaea* L. varieties to *Xylella fastidiosa* subsp. pauca ST53: Systematic literature search up to 24 March 2017.** A. Delbianco, G. Stancanelli y S. Tramontini en *EFSA Journal*, vol. 15, n.º 4, 19 de abril de 2017.
- Homologous recombination and *Xylella fastidiosa* host-pathogen associations in South America.** Helvécio D. Coletta-Filho et al., *Phytopathology*, vol. 107, págs. 305-312, 2017.

SUSCRÍBETE a Investigación y Ciencia...



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
~~82,80 €~~ 75 € por un año (12 ejemplares)
~~165,60 €~~ 140 € por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción (artículos en pdf)

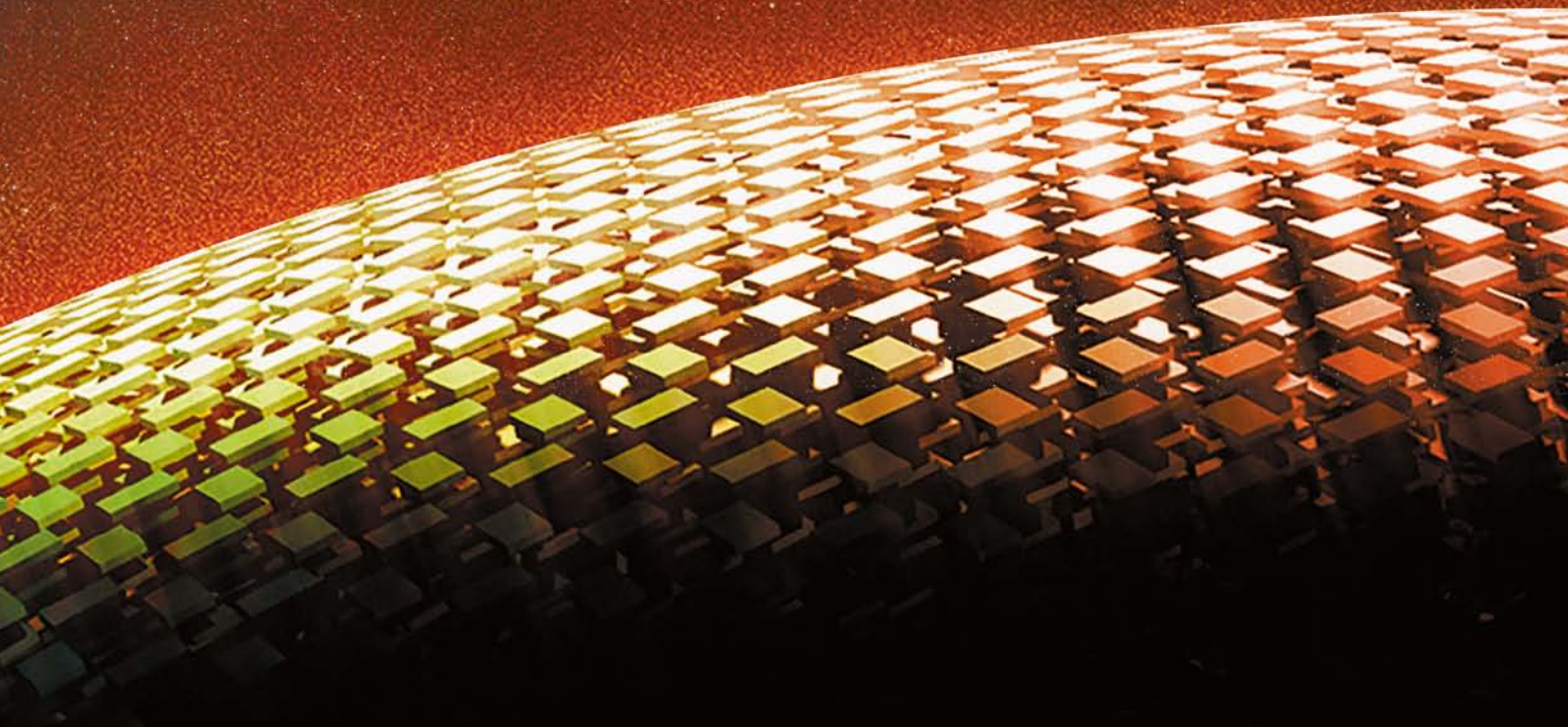
... y recibe gratis 2 números de la colección TEMAS



www.investigacionyciencia.es/suscripciones

Teléfono: +34 934 143 344

AGUJEROS primordiales



NEGROS y materia oscura

COSMOLOGÍA

¿Se compone la materia oscura de agujeros negros creados justo después de la gran explosión?

Juan García-Bellido y Sébastien Clesse

EN SÍNTESIS

Muchos físicos creen que la materia oscura se compone de algún tipo de partícula elemental aún por descubrir. Sin embargo, tras décadas de búsqueda, dichas partículas siguen sin aparecer.

Otra posibilidad reside en que la materia oscura se componga de agujeros negros. Esa hipótesis perdió fuerza hace una década, cuando se vio desfavorecida por varias observaciones astronómicas. No obstante, tales resultados solo invalidaban agujeros negros con masas de hasta diez masas solares.

En los últimos dos años, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) ha detectado fusiones de agujeros negros de hasta 30 masas solares. Nadie sabe cómo pudieron formarse esos objetos tan masivos.

Un modelo reciente en cosmología inflacionaria predice que grandes cantidades de agujeros negros de gran masa debieron crearse poco después de la gran explosión. Sus propiedades podrían explicar tanto la materia oscura como otros enigmas cósmicos aún sin resolver.

Juan García-Bellido es físico teórico del Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC. Sus investigaciones se centran en la cosmología inflacionaria, la energía oscura, los agujeros negros y la gravedad cuántica. Es miembro del proyecto Sondeo de la Energía Oscura (DES) y de las misiones Euclid y LISA, de la ESA.



Sébastien Clesse es investigador posdoctoral en la Universidad Técnica de Aquisgrán. Su trabajo abarca la inflación cósmica, las teorías de gravedad modificada y los agujeros negros primordiales. Es miembro en activo de la misión Euclid y del proyecto de radioastronomía SKA.



HACE MÁS DE MIL MILLONES DE AÑOS, DOS agujeros negros remotos ejecutaron una danza mortal girando en espiral uno alrededor del otro hasta fusionarse. Aquella colisión fue tan violenta que hizo temblar el tejido del espaciotiempo, lo que generó ondas gravitacionales que se propagaron a través del cosmos a la velocidad de la luz. En septiembre de 2015, después de viajar más de mil millones de años luz, esas ondulaciones bañaron nuestro planeta y produjeron un breve «gorjeo» en los sensores del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en Estados Unidos.

podrían dar cuenta de una parte o incluso de la totalidad de la materia oscura, la masa invisible que sabemos que compone el 85 por ciento de toda la materia del universo y que actúa como «pegamento gravitatorio» que mantiene unidas las galaxias y los cúmulos de galaxias. En los próximos años, las observaciones de LIGO y de otros instrumentos permitirán poner a prueba estas ideas, lo que podría conducir a una nueva revolución en nuestra comprensión del cosmos.

Aquella fue la primera detección directa de ondas gravitacionales, lo que confirmaba uno de los fenómenos predichos por la teoría de la relatividad general de Einstein, formulada hace un siglo. Sin embargo, los datos revelaron que cada uno de los agujeros negros que colisionaron era unas 30 veces más masivo que el Sol: entre dos y tres veces más de lo que cabría esperar de los agujeros negros ordinarios, nacidos en las explosiones de supernova de estrellas masivas. Hablamos de objetos tan grandes que resulta difícil explicar cómo pudieron formarse a partir de estrellas. Y aunque se hubiesen gestado de manera independiente a partir de estrellas muy masivas, luego habrían tenido que encontrarse y fusionarse. Sin embargo, la probabilidad de que algo así ocurra en un tiempo igual a la edad actual del universo resulta extremadamente baja. Por tanto, parece razonable sospechar que quizá se creasen en un proceso más exótico, en el que tal vez las estrellas no desempeñaron ningún papel. Más allá de haber detectado ondas gravitacionales, LIGO podría haber descubierto algo mucho más extraordinario: agujeros negros anteriores a la formación de las propias estrellas.

Aunque nunca hayamos visto hasta ahora tales agujeros negros, denominados «primordiales», algunos modelos teóricos indican que una enorme cantidad de ellos pudo haberse formado a partir del plasma denso y caliente que llenaba el cosmos menos de un segundo después de la gran explosión. Esta población hasta ahora oculta de agujeros negros podría explicar varios misterios de la cosmología moderna. En particular, tales objetos

¿AGUJEROS NEGROS O PARTÍCULAS?

En principio, los agujeros negros parecerían candidatos ideales para dar cuenta de la materia oscura, ya que no emiten luz. De hecho, junto con planetas y enanas marrones, fueron propuestos hace tiempo como posible solución al problema. Según esta idea, los centros de las galaxias y los halos esféricos que las rodean albergarían grandes cantidades de MACHO, acrónimo inglés de «objetos compactos masivos del halo». Estos astros generarían la atracción gravitatoria que hace falta para explicar el extraño movimiento de las estrellas y el gas en la periferia de las galaxias. En general, las galaxias rotan más rápido de lo que deberían si su única masa fuese la que podemos ver. La materia oscura proporciona esa atracción adicional que evita que las galaxias en rotación acaben arrojando sus estrellas fuera de sí.

Sin embargo, si los MACHO constituyen la mayor parte de la materia oscura del universo, deberían también dar cuenta de otras observaciones. Sabemos que la materia oscura da forma a las mayores estructuras del universo, ya que determina el origen y el crecimiento de las galaxias, los cúmulos y los supercúmulos. Estas estructuras se agregan a partir de las acumulaciones de gas que hay en el interior de los halos de materia oscura. Los cosmólogos han cartografiado con precisión la distribución espacial de dichas acumulaciones y la han correlacionado con las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas, la radiación fósil de la gran explosión. Además, la masa asociada a las grandes «nubes» de materia oscura de las galaxias y los cúmulos curva el espacio y distorsiona la luz de objetos

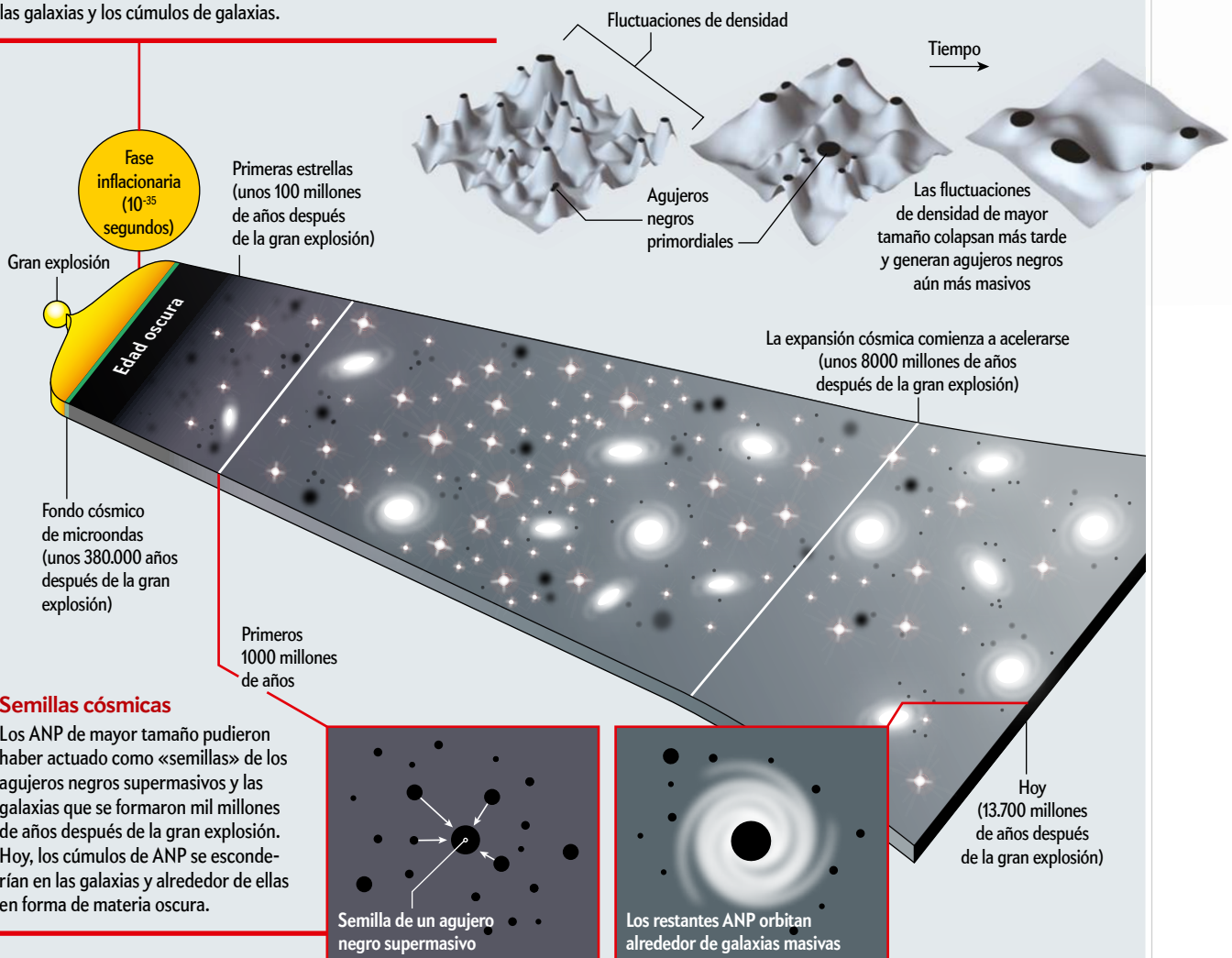
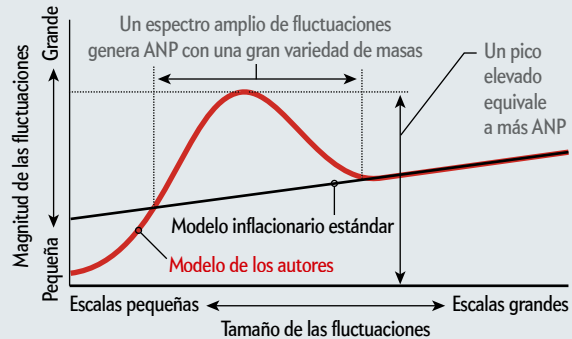
Agujeros negros nacidos en la gran explosión

Los primeros agujeros negros del universo pudieron haberse creado un instante después de la gran explosión, cuando el cosmos no era más que una densa niebla de partículas elementales. En los años setenta, los físicos se percataron de que las regiones más densas de dicha niebla podrían colapsar bajo su propia gravedad y convertirse en agujeros

negros «primordiales» (ANP), así llamados debido a su origen. A medida que el universo evolucionaba y se expandía, estos objetos habrían dado forma a las grandes estructuras cósmicas. Hoy por hoy, los ANP de más de 10 masas solares siguen siendo candidatos viables para explicar la materia oscura.

Agujeros negros primordiales e inflación cósmica

La inflación (una hipotética fase de expansión hiperacelerada que estiró el universo durante la primera fracción de segundo tras la gran explosión) amplificó las fluctuaciones cuánticas hasta escalas inmensas. Al acabar la inflación, dichas fluctuaciones generaron grandes «grumos» de materia, los más densos de los cuales habrían colapsado bajo su propia gravedad para convertirse en ANP. El modelo inflacionario propuesto por los autores predice un pico muy ancho de fluctuaciones (gráfica), lo que se traduce en agujeros negros con un amplio espectro de masas (entre 0,01 y 10.000 masas solares) agrupados en cúmulos. Medio millón de años después de la gran explosión, cada uno de esos cúmulos se extendería cientos de años luz y contendría millones de ANP. Tales objetos habrían influido de manera decisiva en el crecimiento de las galaxias y los cúmulos de galaxias.



lejanos, un fenómeno conocido como lente gravitatoria.

La hipótesis de los MACHO, sin embargo, perdió popularidad hace una década, cuando se comprobó que tales objetos masivos no aparecían en las búsquedas indirectas. En particular, los astrónomos intentaron detectarlos por medio de «microlentes», un tipo de lente gravitatoria que tiene lugar cuando un agujero negro, una enana marrón o incluso un planeta pasa por delante de una estrella y amplifica temporalmente su luz. Diferentes sondeos de varios años de duración efectuados sobre millones de estrellas de las Nubes de Magallanes, las principales galaxias satélite de la Vía Láctea, permitieron descartar que los MACHO de hasta 10 masas solares diesen cuenta de la mayor parte de la materia oscura. Al mismo tiempo, los físicos teóricos hallaron argumentos a favor de una hipótesis alternativa: que la materia oscura estuviese formada por «partículas masivas que interactúan débilmente», o WIMP, por sus siglas en inglés.

Las WIMP constituyen una predicción de algunas extensiones del modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, hasta la fecha se han mostrado tan escurridizas como los MACHO. Pese a décadas de búsqueda con aceleradores de partículas, detectores subterráneos y telescopios espaciales, hoy por hoy no contamos con ningún indicio de la existencia de estas partículas. A medida que se iban acumulando los resultados negativos, algunos investigadores comenzaron a reconsiderar la hipótesis de los MACHO, con énfasis en la idea de que se tratase de agujeros negros primordiales. Pero ¿qué proceso podía haber esparcido estos extraños objetos a lo largo de todo el universo observable? ¿Y cómo podían haber escapado a las observaciones durante tanto tiempo?

AGUJEROS NEGROS DE LA GRAN EXPLOSIÓN

Los agujeros negros primordiales fueron propuestos en los años setenta por los físicos Bernard Carr y Stephen Hawking. Su trabajo consideró agujeros negros con masas menores que la de una montaña. Sin embargo, a lo largo de los casi 14.000 millones de años de vida del universo, esos diminutos objetos ya se habrían «evaporado» como consecuencia de un proceso descubierto por Hawking y conocido con el apropiado nombre de radiación de Hawking. Sin embargo, Carr y Hawking también investigaron la posibilidad de que agujeros negros más masivos y aún sin evaporar diesen cuenta de la masa que parecía faltar en los cúmulos de galaxias.

¿Se compone la materia oscura de agujeros negros primordiales?

Las siguientes observaciones darán la respuesta:

1. Ondas gravitacionales

Cabe esperar que los detectores de ondas gravitacionales, como el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., y Virgo, en Italia, registren nuevas fusiones de agujeros negros. La detección de un número inesperadamente elevado de fusiones de agujeros negros de gran masa apuntaría a un origen primordial de estos, aunque no demostraría que dichos objetos compongan la materia oscura; esa prueba tendrá que llegar por medio de otras observaciones. En última instancia, detectar un agujero negro con una masa inferior al límite de Chandrasekhar (1,45 masas solares), por debajo del cual una estrella no puede dar lugar a un agujero negro, constituiría una prueba irrefutable de su origen primordial. Por fortuna, LIGO podría alcanzar pronto la sensibilidad necesaria para observar un agujero negro así si su compañero es lo suficientemente masivo (más de 10 masas solares). Por último, a escalas cósmicas, una gran población de sistemas binarios de agujeros negros debería generar un fondo difuso de ondas gravitacionales. Dicho fondo podría ser detectado por futuros observatorios espaciales, como la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), proyectada por la ESA, y por redes terrestres de cronometraje de pulsares.

2. Galaxias enanas ultratenues

En 2015, un grupo de astrónomos descubrió decenas de galaxias enanas ultratenues en el halo de la Vía Láctea a partir de los datos del Sondeo de la Energía Oscura (DES). Este hallazgo hace pensar que alrededor de nuestra galaxia podría haber cientos de estos objetos, los cuales contienen una proporción muy elevada de materia oscura. Si esta se compone de agujeros negros primordiales, una gran parte de ellos debería residir en estas galaxias enanas, lo que ofrecería una oportunidad de detectarlos con algunos instrumentos espaciales futuros, como el proyectado por la misión Euclid, de la ESA, y el Telescopio para Sondeos Infrarrojos de Campo Amplio (WFIRST), de la NASA.

3. Variaciones en la posición de las estrellas

La misión Gaia, también de la ESA, está midiendo en estos momentos las posiciones y velocidades de unos mil millones de estrellas de la Vía Láctea con una precisión sin precedentes. Sus resultados podrían revelar la existencia de numerosos agujeros negros masivos aislados, los cuales se manifestarían a través de las pequeñas variaciones que inducirían en el movimiento de las estrellas cercanas.

4. Distribución del hidrógeno cósmico neutro

Antes y durante la formación de las primeras estrellas, el universo estaba compuesto principalmente por hidrógeno neutro, el cual emite una radiación característica con una longitud de onda de 21 centímetros, en la banda de radio. En 2020, el Conjunto del Kilómetro Cuadrado (SKA, que se convertirá en el mayor radiotelescopio de todos los tiempos), comenzará a elaborar un mapa de esta señal de 21 centímetros a lo largo de todo el cielo. La acreción de materia por parte de agujeros negros primordiales generaría una intensa radiación de rayos X que, a su vez, ionizaría el hidrógeno neutro circundante, lo que dejaría una impronta característica en dicho mapa. Si los agujeros negros primordiales masivos componen la materia oscura, el SKA debería poder detectarlos.

5. Distorsiones en el fondo cósmico de microondas

En el universo primitivo, la emisión de rayos X por parte de agujeros negros primordiales que estuviesen engullendo gas y polvo tendría que haber inducido distorsiones en el espectro del fondo cósmico de microondas. La importancia de este efecto es por el momento motivo de controversia, sobre todo en aquellos modelos que predicen que los agujeros negros primordiales han de aparecer en cúmulos. Con todo, una de las misiones propuestas de la NASA, el Explorador de la Inflación Primordial (PIXIE), proyecta medir con precisión tales distorsiones. Sus resultados deberían imponer fuertes restricciones a los modelos que postulan que la materia oscura consta de agujeros negros primordiales.

Esa idea fue retomada en los años noventa en el contexto de la teoría de la inflación cósmica, una propuesta formulada por Alan Guth a principios de los años ochenta. La inflación hace referencia a una hipotética fase inmediatamente posterior a la gran explosión, durante la cual el espacio se habría expandido de manera descomunal: en 10^{-35} segundos, dos puntos inicialmente separados por una distancia inferior a un radio atómico habrían acabado a cuatro años luz, una escala similar a la que nos separa de las estrellas más cercanas. Además, esa expansión habría amplificado las fluctuaciones cuánticas del universo primitivo hasta hacerlas macroscópicas, lo que habría generado las irregularidades necesarias para que más tarde se formasen las grandes estructuras que hoy pueblan el cosmos. Por extraña que parezca, la teoría de la inflación cósmica se encuentra fuertemente respaldada por la observación de las huellas que tales fluctuaciones de densidad dejaron en el fondo cósmico de microondas.

En 1996, uno de nosotros (García-Bellido), junto con Andrei Linde, de Stanford, y David Wands, de la Universidad de Portsmouth, descubrió que la inflación podía generar picos muy abruptos en el espectro de fluctuaciones de densidad del universo primitivo. Es decir, las fluctuaciones cuánticas, enormemente magnificadas por la inflación, producirían de manera natural regiones muy densas. Estas colapsarían bajo su propia gravedad y, menos de un segundo después del final de la inflación, darían lugar a toda una población de agujeros negros. Esos agujeros negros se comportarían como la materia oscura y dominarían el contenido de materia del universo actual.

Aquel modelo predecía una población de agujeros negros en la que todos ellos tenían la misma masa, determinada a su vez por la cantidad de energía presente en la región que sufría el colapso. Más tarde, muchos otros grupos comenzaron a explorar estas ideas con diferentes modelos de inflación cósmica.

En 2015, los dos autores de este artículo propusimos un escenario similar al de 1996, pero en el que las fluctuaciones primordiales exhibían una distribución más ancha de densidades de energía. Como consecuencia, ello daba lugar a agujeros negros primordiales con todo un abanico de masas: entre 0,01 y 10.000 masas solares. Otro aspecto fundamental de este escenario es que las grandes fluctuaciones de densidad colapsan a muy poca distancia unas de otras, por lo que esos agujeros negros de diferentes masas se generan en cúmulos. Medio millón de años después de la gran explosión, cada uno de esos cúmulos podría albergar millones de agujeros negros primordiales en un volumen de pocos cientos de años luz de diámetro.

Dichos cúmulos serían lo suficientemente densos como para explicar las fusiones observadas por LIGO, que de otro modo ocurrirían con muy poca frecuencia. De vez en cuando, las trayectorias de dos agujeros negros de un mismo cúmulo podrían cruzarse, con lo que ambos objetos quedarían ligados gravitacionalmente. Después, orbitarían en espiral durante algunos millones de años y acabarían fusionándose.

En enero de 2015, antes de que LIGO efectuase su primera detección, predijimos que este experimento observaría las ondas gravitacionales generadas en esas enormes fusiones: ondas idénticas a las que aparecieron más tarde, en septiembre de aquel año. Además, nuestros cálculos para la tasa de fusiones de agujeros negros primordiales en estos cúmulos cuadran a la perfección con los límites establecidos por LIGO. Si este y otros observatorios similares registran muchas más fusiones durante los próximos años, tal vez logremos determinar el intervalo de masas y momentos angulares de todos los agujeros negros progenitores. Un análisis estadístico de este tipo aportaría infor-

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Universo oscuro*, uno de los últimos números de nuestra colección de monográficos TEMAS, donde podrás encontrar una panorámica clara y rigurosa sobre el estado actual de la investigación sobre materia y energía oscuras.



www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/84

mación clave para poner a prueba el posible origen primordial de estos agujeros negros.

Un aspecto fundamental de este escenario es que elude los límites que los experimentos de microlentes habían impuesto sobre los MACHO. Como habíamos mencionado arriba, estos descartaban que la materia oscura estuviese compuesta en su mayor parte por agujeros negros de 10 masas solares o menos. Sin embargo, si los agujeros negros primordiales existen y presentan un espectro de masas amplio, los experimentos de microlentes solo podrían detectar una pequeña parte de ellos: la mayoría permanecerían invisibles. Además, si los agujeros negros primordiales se encuentran agrupados en cúmulos, la probabilidad de que uno de tales cúmulos se halle en la línea de visión de las galaxias satélite cercanas exploradas hasta ahora sería inferior a uno entre mil.

Para evitar este problema, podríamos intentar detectar microlentes en otras partes del cielo, como en las estrellas de la vecina galaxia de Andrómeda o incluso en cúasares situados en galaxias distantes. Ello nos permitiría examinar una cantidad mucho mayor de halos galácticos en busca de MACHO; es decir, agujeros negros primordiales. Algunas observaciones recientes hacen pensar que, si bien los MACHO de 10 masas solares o menos no pueden dar cuenta de la totalidad de la materia oscura de un halo galáctico típico, aquellos de entre 0,1 y unas pocas masas solares sí podrían constituir alrededor del 20 por ciento de dichos halos. Este valor resulta compatible con nuestro escenario, en el que los agujeros negros primordiales abarcan un amplio espectro de masas.

En resumen, aún es demasiado pronto para descartar que la mayor parte de la materia oscura se componga de agujeros negros primordiales. Es más: la misma propuesta podría ayudar a resolver otros enigmas relacionados con la materia oscura y la formación de galaxias.

MUCHOS PROBLEMAS, UNA SOLUCIÓN

Los cúmulos de agujeros negros primordiales podrían esclarecer otro persistente misterio: la aparente ausencia de galaxias satélite enanas que deberían formarse alrededor de las galaxias masivas, como la Vía Láctea. Las simulaciones que modelizan la distribución cósmica de materia oscura reproducen con precisión la estructura a gran escala del universo. A escalas menores, sin embargo, las mismas simulaciones predicen que alrededor de las galaxias masivas tendría que haber numerosos subhalos de materia oscura, cada uno de los cuales debería albergar una galaxia enana. Como consecuencia, en las inmediaciones de la Vía Láctea tendría que haber cientos de galaxias enanas que, sin embargo, no se observan [véase «Galaxias enanas y materia oscura», por Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2011].

Se han propuesto varias soluciones al problema de las galaxias satélite perdidas; en particular, la idea de que las simulaciones no lograrían describir por completo la influencia de la materia ordinaria (el hidrógeno y el helio de las estrellas) en la formación y comportamiento de las galaxias enanas predichas. Nuestro modelo parece indicar que, si la mayor parte de la materia oscura estuviese formada por cúmulos de agujeros negros primordiales, estos dominarían los subhalos que rodean a la Vía Láctea, por lo que absorberían parte de su materia ordinaria y reducirían la tasa de formación estelar. Por otro lado, incluso si los subhalos formasen estrellas a un ritmo considerable, sería fácil que estas acabaran expulsadas como consecuencia de los encuentros cercanos con los agujeros negros. Ambos efectos reducirían de manera considerable el brillo de estas galaxias, lo que las haría muy difíciles de detectar sin cámaras de gran campo y extremada sensibilidad. Por fortuna, hoy contamos con tales instrumentos, los cuales nos han permitido descubrir docenas de galaxias enanas ultratenues alrededor de la Vía Láctea. Estos objetos parecen albergar hasta cientos de veces más materia oscura que estrellas, y según nuestro modelo, deberían haber miles de ellos en torno a la Vía Láctea.

Las simulaciones también predicen una población de galaxias de un tamaño intermedio entre las enanas y las masivas. Se dice que estas galaxias son «demasiado grandes para desaparecer», ya que tendrían un tamaño suficiente para formar estrellas con facilidad y, por tanto, deberíamos verlas sin problemas. Sin embargo, nadie las ha encontrado en las inmediaciones de la Vía Láctea. Este problema admite una solución similar al anterior: los agujeros negros primordiales masivos situados en los núcleos de estas galaxias de tamaño intermedio podrían expulsar tanto estrellas como gas, lo que las haría invisibles para la mayoría de los experimentos.

Por último, los agujeros negros primordiales podrían también explicar el origen de los agujeros negros supermasivos. Con masas entre millones y miles de millones de veces mayores que la del Sol, estos colosales han sido observados en cúasares lejanos y en el centro de galaxias masivas en el universo temprano. Sin embargo, si se hubiesen formado a partir del colapso de las primeras estrellas del universo, no deberían haber adquirido masas tan descomunales en un tiempo tan corto (menos de mil millones de años desde la gran explosión).

En nuestro modelo, aunque la mayoría de los agujeros negros primordiales tienen la masa de unas decenas de soles, hay una pequeña fracción con masas mucho más elevadas, entre cientos y decenas de miles de veces mayores que la del Sol. Nacidos menos de un segundo después de la gran explosión, estos objetos habrían actuado como semillas para la formación de las primeras galaxias y cúasares, en cuyos centros habrían aparecido agujeros negros supermasivos con rapidez. Las mismas semillas podrían también explicar la existencia de los agujeros negros de masa intermedia (entre mil y un millón de masas solares) que se han observado orbitando alrededor de algunos agujeros negros supermasivos y en los centros de algunos cúmulos globulares [véase «Agujeros negros de masa intermedia», por Jenny E. Green; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2012].


En definitiva, los agujeros negros primordiales podrían constituir el eslabón perdido entre los agujeros negros de masa estelar y los supermasivos. Las pruebas a favor de este escenario están aumentando con rapidez. Por ejemplo, la manera más sencilla de explicar la reciente detección de una cantidad inesperada de fuentes de rayos X en el universo primitivo es mediante un gran número de agujeros negros primordiales (que, al engullir

gas, emitirían rayos X) menos de mil millones de años después de la gran explosión.

VER EN LA OSCURIDAD

A pesar de que los agujeros negros primordiales masivos podrían resolver el misterio de la materia oscura y otros enigmas cósmicos, aún son posibles otras explicaciones. Los futuros experimentos deberían permitirnos discriminar entre las alternativas. En los próximos años, varias observaciones podrían poner a prueba el escenario basado en agujeros negros primordiales. Estas incluyen observar galaxias enanas ultratenues; detectar la posible influencia de los agujeros negros primordiales masivos en las posiciones de las estrellas de la Vía Láctea; estudiar la distribución del hidrógeno neutro durante la primera época de formación estelar, y medir las distorsiones en el fondo cósmico de microondas.

Más allá de estos experimentos, ahora también disponemos de una herramienta completamente nueva para desentrañar los misterios del universo: los detectores de ondas gravitacionales. Si es cierto que las observaciones de LIGO corresponden a la fusión de agujeros negros primordiales masivos, deberíamos avistar muchas más en los años venideros. En junio de 2016, los científicos de LIGO anunciaron una segunda detección de ondas gravitacionales, emitidas durante la fusión de dos agujeros negros de 14 y 8 masas solares, así como indicios preliminares de otra colisión entre agujeros negros de 23 y 13 masas solares. El pasado mes de junio se anunció un tercer suceso, correspondiente a la fusión de dos agujeros negros de 19 y 32 masas solares. Y, en el momento de concluir este artículo, la colaboración refería indicios de otros siete eventos. Estos resultados parecen indicar que los sistemas binarios de agujeros negros son mucho más abundantes de lo que esperábamos y que las masas de estos objetos pueden abarcar un amplio abanico de valores, en consonancia con nuestra propuesta de agujeros negros primordiales.

En conjunto, estos nuevos experimentos y observaciones podrían confirmar la existencia de agujeros negros primordiales y su posible relación con la materia invisible del universo. Puede que pronto la materia oscura deje de estar sumida en la oscuridad. 

PARA SABER MÁS

Density perturbations and black hole formation in hybrid inflation. Juan García-Bellido, Andrei Linde y David Wands en *Physical Review D*, vol. 54, n.º 10, págs. 6040-6058, noviembre de 1996.

Massive primordial black holes from hybrid inflation as dark matter and the seeds of galaxies. Sébastien Clesse y Juan García-Bellido en *Physical Review D*, vol. 92, n.º 2, art. 023524, julio de 2015.

Did LIGO detect dark matter? Simeon Bird et al. en *Physical Review Letters*, vol. 116, n.º 20, art. 201301, mayo de 2016.

LIGO gravitational wave detection, primordial black holes, and the near-IR cosmic infrared background anisotropies. A. Kashlinsky en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 823, n.º 2, art. L25, junio de 2016.

The clustering of massive primordial black holes as dark matter: Measuring their mass distribution with advanced LIGO. Sébastien Clesse y Juan García-Bellido en *Physics of the Dark Universe*, vol. 15, págs. 142-147, marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tras el rastro de los axiones. Joerg Jaeckel, Axel Lindner y Andreas Ringwald en *lyC*, marzo de 2015.

Materia oscura compleja. Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln en *lyC*, septiembre de 2015.

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia Sintés y Borja Sorazu en *lyC*, febrero de 2017.

Accede a la HEMEROTECA DIGITAL

TODAS LAS REVISTAS DESDE 1985



Suscríbete y accede a todos los artículos

PAPEL

Elige la modalidad mixta y recibirás también las revistas impresas correspondientes al período de suscripción

ARCHIVO

Encuentra toda la información sobre el desarrollo de la ciencia y la tecnología durante los últimos 30 años

DIGITAL

Accede desde cualquier ordenador o tableta al PDF de más de 10.000 artículos elaborados por expertos

www.investigacionyciencia.es

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

ARQUEOLOGÍA

LOS VIKINGOS QUE DESAPARECIERON DE GROENLANDIA

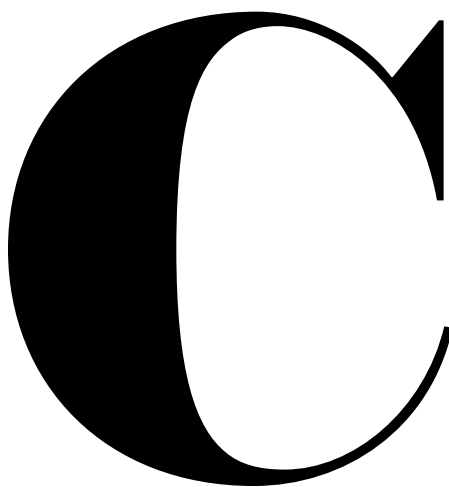


Poseyeron allí unos gélidos asentamientos durante cientos de años, pero finalmente quedaron abandonados. Nuevos hallazgos arrojan luz sobre su misterioso declive

Zach Zorich







CORRÍA EL AÑO 1000 DE NUESTRA ERA. UNA TRIPULACIÓN DE VIKINGOS se dirigía hacia el norte bordeando la costa oeste de Groenlandia. En una embarcación de seis remos, abierta, ponían rumbo al filo del mundo, según pensaban ellos. Mal protegidos contra el viento, la lluvia y las glaciales aguas saladas, la travesía debió de resultar harto desventurada. Ahogamientos e hipotermia debieron de sucederse sin tregua. Con todo, tras quince días de travesía, tal como se describe en un texto histórico, los vikingos arribaron a las playas de la actual bahía de Disko, adonde acuden las morsas arrastrándose fuera del agua para aparearse y descansar. Eran presas fáciles cuyos colmillos de marfil reportaban una fortuna en Europa. La extenuante travesía quedaba generosamente recompensada.

Durante cientos de años, los vikingos, o nórdicos, gobernaron aquellos asentamientos árticos: establecieron dos prósperas colonias que, en su apogeo, llegaron a tener millares de miembros. Pero desaparecieron entre principios y mediados del siglo xv.

Según la explicación clásica, su declive se debió a que los colonos se aferraron al estilo de vida europeo. El aprovechamiento de pastizales para las vacas y ovejas no resultaba adecuado en un clima tan frío y con un terreno tan rocoso como el groenlandés. Sin embargo, las pruebas arqueológicas apuntan cada vez más a que las razones del colapso de las colonias vikingas en Groenlandia fueron mucho más complejas. Por una parte, sí se desprendieron de las tradiciones europeas para adaptarse a las especiales dificultades de Groenlandia; la caza de morsas es un ejemplo de ello. Esta adaptación les permitió perseverar ante el cambio climático que hizo menos habitable un medio ya de por sí hostil. Al final, sin embargo, ni siquiera estas nuevas prácticas pudieron protegerlos de las transformaciones políticas y culturales a gran escala que los marginaron y les supusieron, puede ser, un problema aún mayor que el cambio del clima.

Los vikingos quizá no se habrían asentado nunca en Groenlandia si no hubiera sido por una sucesión de asesinatos cometidos por el famoso y temido Erik el Rojo, cuyas hazañas se relatan en las sagas islandesas. Erik y su padre, antes de que, según cuentan las sagas, los exiliasen a Islandia por su implicación en algunas muertes, eran en Noruega unos pequeños terratenien-

tes. Como Erik no era de los que aprenden la lección a la primera, fue exiliado de nuevo unos años después tras matar a varias personas durante unas disputas con dos vecinos. Pero esta vez no había otras tierras adonde trasladarse. Así que Erik zarpó hacia el oeste sin saber muy bien lo que iba a encontrar al otro lado del mar, y descubrió la masa de tierra que vino a denominarse Groenlandia. Finalizado su exilio en el año 985, regresó a Islandia, reunió a un grupo de colonos, cargaron sus pertenencias en 25 embarcaciones conocidas como *drakkars*, o «naves largas», y partieron hacia las nuevas tierras. Tan solo catorce navíos sobrevivieron a la travesía.

La razón por la que otros vikingos siguieron sus pasos y se asentaron en Groenlandia no está clara. Historiadores y científicos sociales han creído durante mucho tiempo que la decisión fue un último recurso: sospechan que todas las buenas tierras de cultivo de Islandia y de las islas Feroe estaban ya ocupadas y que los vikingos se desesperaban por hallar un espacio abierto en el que criar su ganado. Según otra teoría, los colonos habrían picado en una treta publicitaria. Se dice que Erik el Rojo denominó Groenlandia (que significa «tierra verde») a un lugar rocoso y cubierto de hielo para atraer a nuevos colonos.

Les motivara la pura desesperación o la perspectiva de un paraíso, el hecho es que los vikingos partieron en masa desde Islandia y Europa hacia Groenlandia; la oleada inicial de migraciones se produjo alrededor del año 1000. Ocuparon la mayor

EN SÍNTESIS

Tras una prosperidad que duró cientos de años, las colonias vikingas de Groenlandia fueron abandonadas misteriosamente.

Los especialistas siempre han considerado que su declive obedeció a una obstinada negativa a adaptar sus costumbres europeas a las condiciones árticas.

Pero los últimos hallazgos muestran que los vikingos de Groenlandia sí cambiaron sus tradiciones. Pruebas recientes indican que fue una compleja interacción de fuerzas políticas y culturales externas lo que causó su desaparición.



1



2



3



4

CORTESÍA DE LENNART LARSEN. MUSEO NACIONAL DE DINAMARCA CC-BY-SA (1, 2, 4); © DEL PATRONATO DEL MUSEO BRITÁNICO (3)

VARIOS OBJETOS revelan facetas de la vida vikinga en Groenlandia. Un anillo y un báculo de la tumba de un obispo (1) atestiguan la influencia de la Iglesia en las colonias. Los vikingos groenlandeses mantenían lazos culturales con Europa, compartían sus modas (2) y costumbres. Pero también se construyeron un nicho económico al emprender nuevas actividades, como la caza de morsas o la exportación de colmillos de marfil a Europa, donde se hacían adornos con ellos, como, quizá, las famosas piezas de ajedrez de Lewis (3). Los vikingos también tuvieron contacto con los inuits de Groenlandia, que según parece tallaron en madera imágenes de los nuevos pobladores (4).

parte de los mejores puertos y tierras de cultivo. Los que llegaron más tarde tuvieron que construir sus granjas en zonas menos productivas. Empezó a conformarse una sociedad cuando estos campesinos libres llevaron allá a sus familias y reclamaron como propia cualquier tierra donde pastaran sus ovejas y vacas. Las granjas se concentraban en dos zonas de la costa oeste de la isla: el denominado asentamiento occidental, situado 800 kilómetros al sur de las zonas de caza de morsas de la bahía de Disko, y el asentamiento oriental, 500 kilómetros al sur del primero.

Las ruinas descubiertas en Vatnahverfi, cerca del punto más meridional de Groenlandia, han ayudado a los arqueólogos a formarse una idea de las características de estos asentamientos. Vatnahverfi parece haber sido una de las zonas agrícolas más ricas del oriental. Allí la tierra se extiende en forma de brazos que se adentran en el océano. Más allá de esas angostas playas de piedra, la hierba recubre el terreno y proporciona buen pasto para las ovejas, tal y como ocurría en la época vikinga. Todo lo que queda de los antiguos edificios son cúmulos de piedras cubiertas de musgo. Su disposición muestra que las granjas fueron erigidas a la manera de las escandinavas e islandesas. El edificio principal se situaba en el centro de las mejores tierras de pastoreo, rodeadas a su vez por los pastizales menos deseables. En ellos se erigían edificios más pequeños que les servían de alojamiento cuando sacaban a pastar los rebaños por diferentes zonas de sus tierras. Un equipo de excavación dirigido por Konrad Smiarowski, doctorando del Colegio Universitario Hunter de Nueva York, identificó en Vatnahverfi 47 alquerías distribuidas alrededor de ocho granjas.

Las granjas vikingas del yacimiento abarcaban un área tan extensa que tuvieron que construir estructuras más pequeñas que sirviesen como refugio temporal de los rebaños y como espacio de trabajo donde los campesinos pudieran ordeñar las vacas, esquilan las ovejas y procesar la carne y los productos lácteos. El equipo de Smiarowski ha hallado 86 cabañas en esta zona durante los últimos doce años. Sus descubrimientos y los de otros investigadores indican que la comunidad campesina de Vatnahverfi albergó entre 255 y 533 personas.

Las granjas establecieron la jerarquía en que se cimentaba la sociedad groenlandesa, explica Thomas McGovern, arqueólogo de Hunter que ha trabajado en yacimientos de Groenlandia y otros lugares del Atlántico Norte desde 1970. Las élites vikingas propietarias de la tierra dependían de que la gente siguiera viviendo allí, añade Jette Arneborg, del Museo Nacional de Dinamarca, en Copenhague. Así pues, los terratenientes alojaban a las familias de campesinos y concedían acceso a los pastos a cambio de una parte de los beneficios de los productos pecuarios. Las colonias prosperaron con este sistema, y en su apogeo, entre el año 1200 y 1250, llegaron a alcanzar cerca de los 3000 residentes, explica Arneborg.

CUANDO LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS EMPEORARON, COMO ocurrió poco después de la llegada de los colonos, los vikingos aguantaron el desafío. Proporcionar el suficiente heno a los cerdos y al ganado para pasar el invierno demostró ser una ardua tarea en Groenlandia, así que los campesinos se centraron sobre todo en la cría de ovejas. En las peores zonas de pastoreo tenían cabras porque son animales que se alimentan de casi cualquier cosa. La leche de oveja y de cabra reemplazó a la de vaca como ingrediente principal de la alimentación. Solo criaban algunos cerdos y reses, en su mayoría para celebraciones y para el consumo de los más ricos.

Como las granjas no producían lo suficiente para mantener a toda la población, fue necesario buscar nuevas fuentes de

alimento. Los vertederos que dejaron los vikingos groenlandeses muestran que empezaron a cazar focas a gran escala poco después de su llegada. Es probable que lo hiciesen en las aguas abiertas de los fiordos; ayudándose de barcas y redes reunirían a los animales en grupos compactos para poder arponearlos. También comenzaron a cazar caribúes y morsas. La explotación económica de estos animales debió de requerir un sistema de caza comunal, con una fuerza laboral considerable y una estrecha coordinación entre un jefe y los demás en la partida de caza. Los vikingos contaban con una ventaja para adoptar esta nueva práctica: ya habían utilizado un sistema similar en el trabajo de las granjas. La organización de estas les sirvió de referencia para gestionar los grupos de caza y los recursos alimentarios de manera eficaz. Las cacerías colectivas se convirtieron, como los cambios en la gestión de las granjas, en una adaptación única al medio de Groenlandia.

Los vikingos no crearon esas estrategias de la nada. Sus innovaciones parecen haber surgido del conocimiento técnico que llevaron consigo desde Islandia y Escandinavia. Los ecólogos llaman a esta colección de saberes «conocimiento ecológico tradicional», el conjunto de comportamientos y técnicas perfeccionados durante generaciones mediante el contacto con el medio. La caza de la foca se practicaba en el mar Báltico y en Islandia, pero se trataba de una especie distinta de la que se capturaba en Groenlandia. Puede que los vikingos también tuvieran experiencia en la caza de morsas en Islandia. En ambos casos, los colonos tuvieron que adaptar las técnicas que ya conocían a las circunstancias particulares que encontraron en las tierras árticas.

Mientras los trabajadores intentaban encontrar la manera de llenarse el estómago, la élite terrateniente buscaba modos de aumentar su influencia. Construir iglesias y consagrar terreno para cementerios era una manera de conseguirlo. Las granjas se encontraban muy distantes entre sí, por lo que los lugares de reunión resultaban cruciales para la vida social de los asentamientos. «Tenían que crear una comunidad de algún modo», explica Smiarowski. Las iglesias sirvieron para congregarse a la gente en bodas, funerales y misas regulares.

Las iglesias también cumplieron otra función. En 1123 la Iglesia nombró obispo de Groenlandia a un cura llamado Arnald. La Iglesia ya empezaba a considerar Groenlandia como un recurso económico.

A medida que aumentaba el comercio entre Europa y Groenlandia, los independientes colonos buscaron modos de aprovechar la relación. Pidieron a Haakon IV, rey de Noruega, que anexionara Groenlandia a su reino. Los groenlandeses pagarían impuestos a Noruega y el rey garantizaría que un barco, el *Mercante Groenlandia*, viajara a Groenlandia cada año para comprar y vender bienes. Estas misiones comerciales mantuvieron a Groenlandia vinculada con la economía y cultura europeas. Como resultado, los vikingos «usaban los mismos vestidos y el mismo tipo de peines de doble fila de púas» que los europeos, explica Arneborg.

Los barcos comerciales, como el *Mercante Groenlandia*, habrían transportado también bienes y personas para la Iglesia. En 1341 el obispo de Bergen envió a un cura a Groenlandia con el encargo de elaborar una lista de las iglesias y las propiedades que pertenecían a la institución. Los papas apreciaban los adornos de marfil; el obispo se encargaría de mantener las líneas de abastecimiento abiertas entre Groenlandia y Roma, explica Mikkel Sørensen, especialista de la Universidad de Copenhague en historia y arqueología de los inuits de Groenlandia. Arneborg, por su parte,

Lazos que unen

Los vikingos empezaron a desplazarse en masa a Groenlandia desde Islandia y otras partes de Europa alrededor del año 1000. Establecieron dos colonias: el asentamiento oriental y el occidental. Con todo, mantuvieron vínculos políticos y culturales con Europa. Crearon sus granjas, en sitios como Vatnahverfi, al estilo de las granjas vikingas de Escandinavia e Islandia, y mantuvieron el pasto para sus vacas y ovejas. Pero tuvieron que

encontrar nuevas fuentes de alimentos y de ingresos. Se pusieron a cazar focas y caribúes y navegaron en pequeñas embarcaciones hacia la costa oeste de la bahía de Disko para cazar morsas, atraídos por sus colmillos de marfil. Los vikingos exportaban marfil y pieles a Europa en un barco enviado desde Bergen. Los acuerdos funcionaron bien hasta que esos artículos de lujo dejaron de interesar en los mercados europeos.



opina que a la Iglesia le interesaba más el dinero del comercio del marfil que el propio marfil. En cualquier caso, los reyes noruegos controlaban lo que constituía casi el único suministro de este material para Europa en aquel momento. La relación parece haber sido muy beneficiosa para todos durante más de un siglo. Se han encontrado restos de marfil de morsa en yacimientos de talleres medievales desde Escandinavia hasta Irlanda y Alemania, lo que muestra que la demanda se extendió por Europa.

Sin embargo, se avecinaban cambios drásticos. Los análisis de testigos sedimentarios del suelo marino del noroeste de Islandia muestran que alrededor del año 1250 el clima empezó a entrar en una fase denominada Pequeña Edad de Hielo. Durante esta época las temperaturas se desplomaron y los sistemas climáticos se volvieron erráticos. Aumentaron la frecuencia y la intensidad de las tormentas. Como conjetura McGovern, el largo trayecto oceánico entre Islandia y Groenlandia resultaría desde entonces más traicionero, lo que podría haber desanimado a los buscadores de fortuna poco deseosos de arriesgarse a perder sus embarcaciones.

Aunque los asentamientos vikingos en Groenlandia perduraron alrededor de otros 200 años, muchos estudiosos han visto los comienzos de la Pequeña Edad de Hielo como el principio de su declive. Sospechan que por la falta de voluntad o de capacidad para cambiar con los tiempos, las colonias empezaron a desmoronarse.

Pero McGovern no está convencido de que el mal tiempo fuera suficiente para acabar con los asentamientos. «Alrededor

de 1250, los groenlandeses ya llevaban instalados muchos años y no todo había sido cálido y acogedor. Habían aguantado épocas malas, y sabían que había tormentas y que algunas veces la gente se ahogaba», explica.

En contra de la opinión de que se habían quedado anclados en sus modos de vida tradicionales, los vikingos parecen haber afrontado las dificultades de manera muy efectiva. Los huesos hallados en los basureros de las granjas medievales a lo largo de Groenlandia indican que se centraron de manera cada vez más estricta en la cría de ovejas y cabras, capaces de sobrevivir con menor cantidad de hierba. Con todo, los pequeños propietarios encontraban dificultades para alimentar a sus rebaños. Tuvieron que elegir entre convertirse en arrendatarios de los grandes terratenientes o vender sus tierras y buscar nuevos modos de subsistencia. Optaron por la primera opción. Y funcionó, al menos durante un tiempo.

Pero el mundo también se estaba transformando en otros aspectos que nada tenían que ver con el clima. La compleja interacción de estos cambios podría haber sido lo que terminó con las colonias vikingas de Groenlandia.

Quizás el factor más importante fue que los acontecimientos mundiales empezaron a erosionar el comercio de marfil de morsa. Las guerras entre cristianos y musulmanes en Oriente Medio habían contribuido a que Groenlandia desempeñara un papel principal en el comercio del marfil. Esos conflictos bélicos propiciaron una piratería rampante en el mar Mediterráneo y obstaculizaron el transporte de marfil de elefante desde África



LAS RUINAS DE PIEDRA de la iglesia de Hvalsey, construida en una alquería del asentamiento oriental vikingo, parecen datar del siglo xiv.

y Asia hasta Europa. Al escasear el marfil de elefante y encarecerse en Europa, el recorrido de 2800 kilómetros hasta Groenlandia en busca de marfil de morsa se convirtió en una opción más rentable que el trayecto a África y Asia, que era más corto pero más peligroso. Sin embargo, es posible que para cuando las guerras en Oriente Medio se aplacaron y se reanudó el comercio con los dos continentes Europa hubiera perdido el interés en Groenlandia, como explica Søren Sindbæk, profesor de arqueología medieval de la Universidad de Aarhus.

Al mismo tiempo, los cambios en la moda podrían haber reducido la demanda de marfil y de otros bienes de lujo. El marfil pasó de material escaso y preciado en joyería y otras artesanías a dejar de ser deseado por las élites alrededor del año 1200. Esta tendencia parece haber coincidido con un cambio en el tipo de comercio que interesaba a los mercados europeos, señala McGovern. El comercio dio un giro y dejó de basarse en bienes de gran prestigio, como el oro, las pieles o el marfil, para centrarse en productos a granel y de menor valor; tales como las balas de pescado seco y los rollos de tejido de lana que producía Islandia. «El marfil de morsa solo tiene valor si la gente dice que lo tiene», explica. Por el contrario, el pescado y la lana son alimentos y ropa que pueden abastecer a los ejércitos.

Esa transición marcó un cambio fundamental en el modo de funcionamiento de la economía europea. «Los groenlandeses se estancaron en la vieja economía. Los islandeses estaban en mucha mejor posición para aprovechar el comercio en expansión de productos a granel, y eso es lo que hicieron», observa McGovern.

Los estragos que causó la peste negra en Europa socavaron aún más la economía de Groenlandia. Entre 1346 y 1353, cerca de un tercio de la población europea murió de esta plaga. Se cebó sobre todo con Noruega, que perdió el 60 por ciento de la población. Los noruegos dejaron de enviar barcos desde 1369, y así imposibilitaron a los vikingos la exportación de piel y marfil de morsa, cuya demanda ya estaba decayendo.

Los vikingos de Groenlandia también se encontraron con otros problemas en su terruño: los invasores del norte. Cuando Erik el Rojo construyó su granja parecía que nadie más habitaba esas tierras. Es posible que un grupo conocido como paleoesquimales, o dorsets, ya residiera en el territorio, pero, en todo caso, muy al norte de la bahía de Disko, en zonas ignotas para los vikingos, por lo que eran invisibles para estos. Más tarde, en el siglo xiv, un grupo inuit conocido por los especialistas como los thules empezó a ir en embarcaciones cubiertas de pieles denominadas *umiaks* costa abajo, hacia los territorios de caza de morsas de los vikingos.

Los thules se especializaban en la caza de ballenas y sus *umiaks* organizaban la sociedad thule como las granjas la vikinga. En los *umiaks* cabían cerca de 15 personas sentadas; el dueño de la embarcación desempeñaba el papel de jefe, explica Sørensen. Con toda probabilidad, la primera vez que se toparon con los vikingos iban en busca de ballenas a las zonas de caza de la bahía de Disko. Un documento del siglo xiv denominado *Descripción de Groenlandia* indica que el encuentro no fue pacífico: los vikingos recibieron a los thules con su diplomacia característica, es decir, enfrentándose a ellos.



Pese a toda su ferocidad, los vikingos habrían llevado las de perder. Alrededor del año 1350 abandonaron el asentamiento occidental, más cercano a los terrenos de caza de la bahía de Disko que el oriental. La razón por la que dejaron atrás 80 granjas y un acceso más cómodo a las morsas sigue siendo tema de debate. Pero según McGovern, siempre que se menciona a los inuits en las sagas hay combate. Por tanto, es posible que los vikingos desalojaran esa zona porque no pudieron defenderse de la invasión thule.

EL EMPEORAMIENTO DEL CLIMA, LAS TRANSFORMACIONES POLÍTICAS, los cambios en la moda, la propagación de la peste y la llegada de invasores crearon un conjunto de problemas que los vikingos no habían visto antes. Se encontraron en una situación que superaba los conocimientos que poseían del medio. Como resultado, los groenlandeses se vieron obligados a tomar decisiones difíciles para mantener viva su sociedad. ¿Redoblarían esfuerzos con las mismas estrategias que les habían servido bien, como la caza comunal, que había permitido a sus antepasados sobrevivir al clima ártico? ¿O desarrollarían formas novedosas de adaptarse a los nuevos desafíos que se les presentaban? Según Arneborg y McGovern, las pruebas arqueológicas dan a entender que los groenlandeses centraron sus esfuerzos en mantener la caza y en seguir haciendo lo que tan bien había funcionado al principio, cuando se asentaron, y no cesaron hasta el final.

Los terratenientes más ricos incluso continuaron renovando sus iglesias casi hasta el momento del abandono de las colonias,

lo que podría haber sido parte del problema. «Si inviertes en edificios, en una iglesia, te consolidas en un lugar», dice Marten Scheffer, matemático aplicado de la Universidad de Wageningen que ha dedicado gran parte de su carrera a realizar modelos matemáticos de las causas del colapso social. Cuando una sociedad se acerca a un momento crítico, explica, se vuelve más lenta a la hora de recuperarse de las adversidades, incluso de las menores. Aquello que proporciona resiliencia a esa sociedad (la comida, la riqueza, la tecnología) se vuelve escaso y dificulta la adaptación. Pero otro elemento que entorpece la recuperación es lo que Scheffer denomina «efectos de los costes irreversibles», es decir, de los edificios y el equipamiento que permiten a la sociedad extraer del medio lo que necesita. En el caso de los vikingos, no solo se trataba de las embarcaciones y el equipo para cazar focas y morsas, sino también de los elementos de su cultura que les unían a Europa, como las nuevas iglesias. El esfuerzo invertido en la construcción de edificios y la fabricación de equipamiento reduce la probabilidad de que las poblaciones los abandonen incluso cuando habría razones económicas para hacerlo. «Tienden a quedarse demasiado tiempo en el mismo lugar y, al final, se van. Lleva bastante tiempo, pero después se marchan en masa», explica Scheffer, quien piensa que esto podría haber sido lo que les ocurrió a los vikingos.

¿Habrían podido quedarse de haber tomado otro tipo de decisiones? Algunos expertos han sugerido que los vikingos deberían haber adoptado un sistema de vida más parecido al de los inuits. Después de todo, los inuits se las apañaron bien y todavía hoy siguen viviendo en Groenlandia. Con todo, este argumento ignora la razón por la que los vikingos llegaron allí en un principio. Si lo que querían era hacer fortuna vendiendo colmillos de morsa al mercado europeo, la ambición de un inuit de llegar a capitanear su propio *umiak* quizá no les habría atraído tanto. «Vivían en el margen de todo el sistema europeo, así que era muy importante mantener el contacto a través del comercio. Querían seguir siendo verdaderos europeos. Tiene mucho que ver con la cuestión de la identidad», asevera Sørensen.

Para mediados del siglo xv las alternativas debían de ser arduas. Incluso los terratenientes con las mayores granjas y las mejores iglesias, viéndose ante la muerte por inanición o en combate, habrían tenido que preguntarse, ¿por qué no cerrar la granja, montarse en un barco y retornar a Europa? Una posible respuesta es que lo que les esperaba al regreso podría ser incluso peor: una Europa que formaba parte de un nuevo sistema económico donde los cazadores de focas y morsas no tenían cabida. Puede que los vikingos conquistaran Groenlandia pero, al final, fuerzas superiores, más allá de sus costas heladas, les doblegaron a ellos. 🐋

PARA SABER MÁS

The world of the vikings. Richard Hall. Thames & Hudson, 2007.

Critical transitions in nature and society. Marten Scheffer. Princeton University Press, 2009.

Vatnahlverfi: A green and pleasant land? Palaeoecological reconstructions of environmental and land-use change. Paul M. Ledger et al. en *Journal of the North Atlantic*, número especial, vol. 6, págs. 29-46, 2014.

Was it for walrus? Viking age settlement and medieval walrus ivory trade in Iceland and Greenland. Karim M. Frei et al. en *World Archaeology*, vol. 47, n.º 3, págs. 439-466, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La nave longa vikinga. John R. Hale en *lyC*, abril de 1998.

La picadura de una medusa

Ante la presencia de presas o depredadores, estos organismos liberan uno de los venenos más tóxicos del reino animal

Las medusas son unos de los animales más primitivos de nuestro planeta. Surgieron en los océanos hace más de 600 millones de años y, desde entonces, sus características morfológicas apenas han cambiado. Su sencillez anatómica les ha permitido sobrevivir en la mayor parte de los hábitats marinos e incluso de los dulceacuícolas.

Una explicación de su éxito evolutivo la hallamos en unas células denominadas cnidocitos, una de las armas biológicas más eficaces conocidas en el reino animal. Concentrados en los tentáculos, aunque distribuidos por todo el ectodermo de la medusa, los cnidocitos son específicos de todos los cnidarios. En estas células se almacena el veneno que la medusa inocula a sus presas para anestesiarlas antes de ingerirlas o, por el contrario, emplea como mecanismo de defensa contra los ataques de depredadores. Ante alguna de esas situaciones, en tan solo 3 milisegundos el cnidocito dispara un filamento que descarga el veneno. Se trata de uno de los procesos de exocitosis (expulsión de sustancias por parte de la célula) más rápidos conocidos hasta el momento.

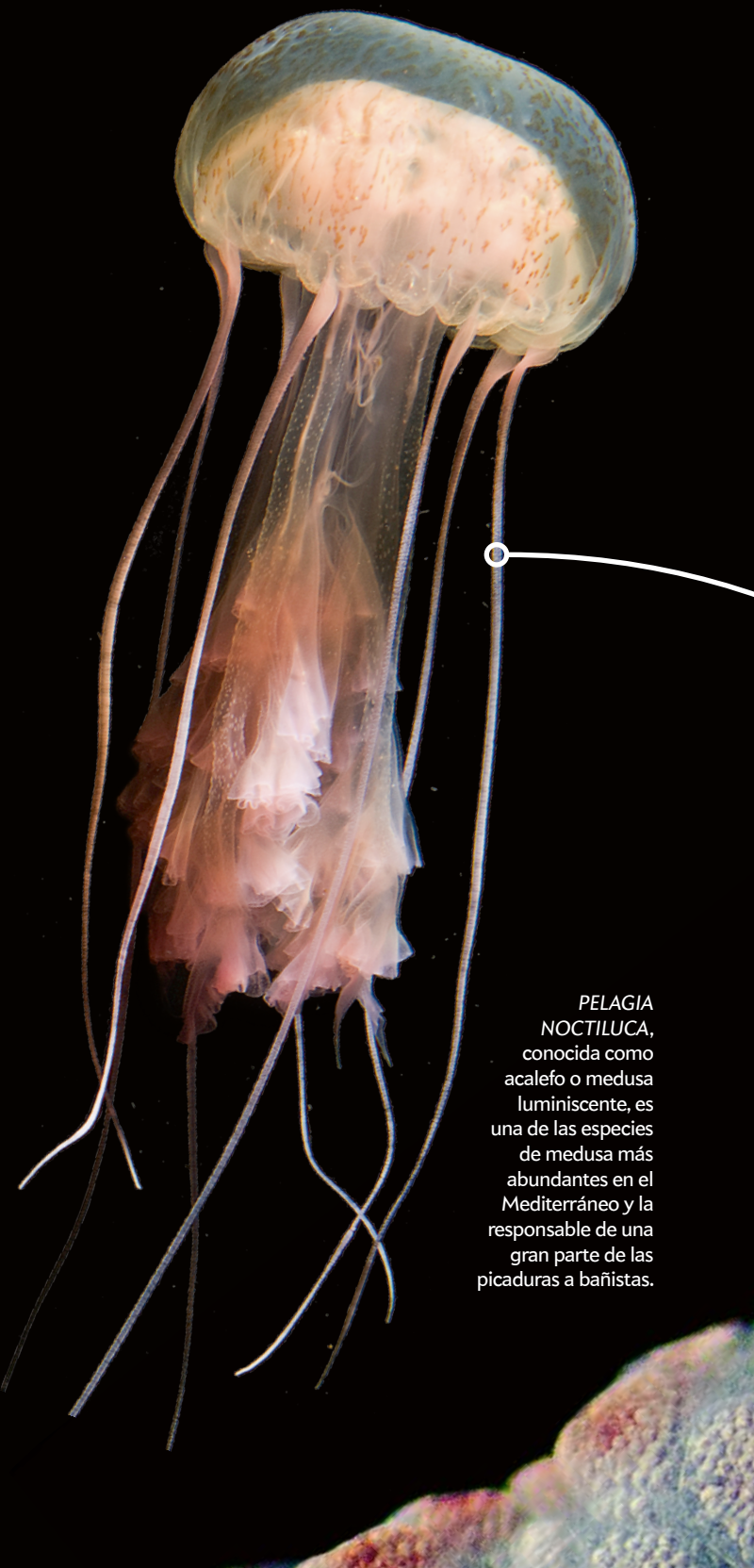
La composición del veneno y, por consiguiente, su toxicidad varían de una especie de medusa a otra. La virulencia de la picadura en los humanos dependerá, pues, de la toxicidad, pero también de la cantidad de veneno inoculado. Algunas medusas del Mediterráneo, como *Pelagia noctiluca*, *Rhizostoma pulmo* o *Carybdea marsupialis*, están catalogadas como especies de toxicidad media-alta. Tras el contacto accidental con los bañistas en las playas, activan su mecanismo de defensa natural y con ello generan riesgos para la salud pública. En algunas zonas de la costa española, más de la mitad de las asistencias médicas solicitadas se deben a picaduras de medusa.

En el marco del proyecto de investigación Repercusiones Clínicas y Medioambientales de las Medusas en el Mediterráneo (RECLAIMED), nuestro grupo del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona, junto con el Hospital Clínico de Barcelona, estamos realizando ensayos in vitro para determinar la eficacia de distintos tratamientos de atención preclínica. Con ellos buscamos la manera de impedir el disparo de los cnidocitos mediante la inactivación de estas células. Entre los tratamientos ensayados destacan la aplicación de vinagre, amoníaco, agua dulce, bicarbonato sódico, calor y frío. Intentamos aclarar cuál es el tratamiento más adecuado, puesto que no existe consenso internacional sobre ello, además de que no hay metodologías estandarizadas que permitan comparar los resultados entre distintos laboratorios de forma rigurosa.

—Ainara Ballesteros

—Rubén Duro

Instituto de Ciencias del Mar
de Barcelona (CSIC)



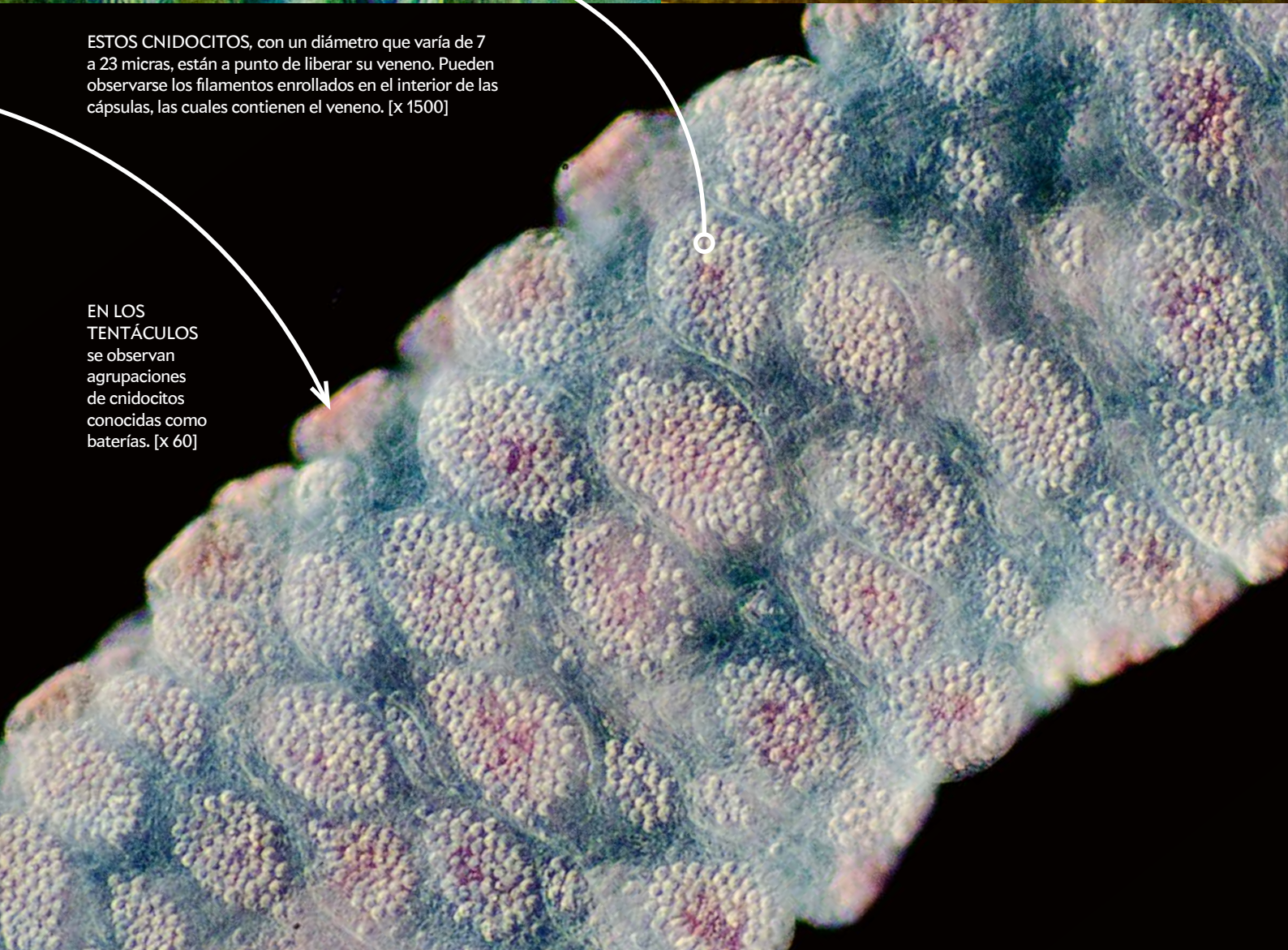
PELAGIA NOCTILUCA, conocida como acalefo o medusa luminiscente, es una de las especies de medusa más abundantes en el Mediterráneo y la responsable de una gran parte de las picaduras a bañistas.



TRAS LA PICADURA, se observan los filamentos de los cnidocitos totalmente extendidos y las cápsulas vacías sin el veneno. [x 600]



ESTOS CNIDOCITOS, con un diámetro que varía de 7 a 23 micras, están a punto de liberar su veneno. Pueden observarse los filamentos enrollados en el interior de las cápsulas, las cuales contienen el veneno. [x 1500]



EN LOS TENTÁCULOS se observan agrupaciones de cnidocitos conocidas como baterías. [x 60]



Los problemas cuánticos inspiran nuevas matemáticas

Para entender completamente el mundo cuántico podríamos tener que desarrollar una nueva rama de las matemáticas

Puede que las matemáticas tengan de ciencia ambiental más de lo que pensamos. Aunque resulten de una búsqueda de verdades eternas, muchos conceptos matemáticos tienen sus orígenes en la experiencia cotidiana. La astrología y la arquitectura inspiraron a egipcios y babilonios el desarrollo de la geometría. El estudio de la mecánica durante la revolución científica del siglo XVII dio como resultado el cálculo infinitesimal.

Las ideas provenientes de la teoría cuántica han resultado tener un impresionante potencial matemático, a pesar de la poca experiencia cotidiana que tenemos con las partículas elementales. El extraño mundo de la teoría cuántica —en el que las cosas parecen estar en dos sitios a la vez y todo está gobernado por las leyes de la probabilidad— no solamente representa una descripción de la naturaleza más fundamental que la ofrecida por teorías anteriores, sino que también proporciona un rico campo de desarrollo para las matemáticas modernas. ¿Es posible que la estructura lógica de la teoría cuántica, una vez completamente entendida y asimilada, inspire un nuevo campo de las matemáticas que podríamos llamar «matemáticas cuánticas»?

Existe una larga e íntima relación entre las matemáticas y la física. Ya Galileo escribió acerca de ese libro esperando a ser descifrado que es la naturaleza: «La filosofía se encuentra escrita en este gran libro, el universo, que está continuamente abierto ante nuestros ojos. Pero el libro no puede ser comprendido a menos que uno aprenda antes a entender el idioma y a leer las letras en que está escrito. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas». En épocas más recientes podemos citar a Richard P. Feynman, que no era conocido

como un experto en matemáticas abstractas: «Adquirir una verdadera percepción de la belleza, la profunda belleza de la naturaleza, resulta difícil para aquellos que no conocen las matemáticas. [...] Si queremos aprender acerca de la naturaleza y apreciarla, es necesario entender el lenguaje en que nos habla». (El mismo Feynman dijo también que «si todas las matemáticas desaparecieran de repente, la física sufriría un atraso de exactamente una semana», a lo que un matemático añadió la inteligente apostilla: «pero sería justo la semana en la que Dios creó el mundo».)

El físico matemático y premio Nobel Eugene Wigner escribió elocuentes palabras acerca de la sorprendente capacidad de las matemáticas para describir la naturaleza, una idea que expresó como «la irrazonable eficacia de las matemáticas en las ciencias naturales». Los mismos conceptos matemáticos se presentan en un espectro muy amplio de contextos. Pero en estos momentos parece que estamos presenciando lo contrario: la irrazonable eficacia de la teoría cuántica en las matemáticas. Las ideas originadas en la física de partículas tienen una extraña tendencia a aparecer en los más diversos campos de las matemáticas. Esto se aplica en especial a la teoría de cuerdas, cuya estimulante influencia en las matemáticas ejercerá un impacto permanente y gratificante, con independencia de la importancia que la teoría tenga finalmente para la física fundamental. De hecho, el número de disciplinas matemáticas que ha tocado la teoría de cuerdas produce vértigo: análisis, geometría, álgebra, topología, teoría de representaciones, combinatoria, teoría de la probabilidad... y podríamos continuar

la lista —¡uno llega a sentir pena por el pobre estudiante en la tesitura de tener que aprender todo esto!

¿Cuál es la razón última de esa irrazonable eficacia de la teoría cuántica? En mi opinión, la respuesta guarda una estrecha relación con el hecho de que, en el mundo cuántico, todo lo que puede pasar, de hecho, pasa.

Hablando de modo muy esquemático, la mecánica clásica intenta calcular la forma en que una partícula viaja de A a B . El camino escogido puede ser, por ejemplo, a lo largo de una geodésica, la curva de longitud mínima en un espacio curvado. En la mecánica cuántica, sin embargo, uno considera la colección de todos los posibles caminos entre A y B , independientemente de lo largos o retorcidos que sean. Esta es la famosa «suma sobre historias» de Feynman. Las leyes de la física asignan a cada camino un cierto peso en esa suma, que determina la probabilidad de que la partícula se mueva a lo largo de dicha trayectoria particular. La solución clásica que obedece las leyes de Newton es simplemente la más probable entre todas las posibles. Así, de una forma natural, la física cuántica trabaja con el conjunto de todos los caminos posibles, en el que cada uno contribuye con un determinado peso. Ello nos permite sumar sobre todas las posibilidades.

Esta estrategia holística de considerar todo al mismo tiempo está en el espíritu de las matemáticas modernas, en donde el estudio de «categorías» de objetos se centra mucho más en sus relaciones mutuas que en ejemplos individuales. La panorámica a vista de pájaro que nos proporciona la teoría cuántica es fuente de nuevas y sorprendentes conexiones.

Calculadoras cuánticas

Un ejemplo de la magia de la teoría cuántica es la simetría «especular», una asombrosa equivalencia entre espacios que ha revolucionado la geometría. La historia comienza en la geometría enumerativa, una rama no muy excitante aunque bien establecida de la geometría algebraica que se ocupa de contar objetos. La meta de los investigadores puede ser, por ejemplo, contar el número de curvas en espacios de Calabi-Yau, soluciones de seis dimensiones a las ecuaciones de Einstein de la gravitación que son particularmente interesantes en teoría de cuerdas, ya que pueden usarse para enrollar las dimensiones adicionales.

De la misma manera en que podemos arrollar una goma elástica en torno a un cilindro un determinado número de veces, las curvas en un espacio de Calabi-Yau están clasificadas por un número entero (grado de la curva), que mide el número de veces que esta se arrolla. Encontrar el número de curvas de un grado dado es un famoso problema muy difícil de resolver, incluso para el espacio de Calabi-Yau más simple, la llamada quintica. Un resultado clásico, obtenido ya en el siglo XIX, establece que el número de líneas (curvas de grado uno) es 2875. El número de curvas

de grado dos solo se consiguió evaluar en 1980 y resultó que era mucho más grande: 609.250. Pero el cálculo del número de curvas de grado tres necesitó ya de la ayuda de los teóricos de cuerdas.

En torno a 1990, un grupo de físicos teóricos que trabajaban en teoría de cuerdas pidió a los geómetras que calcularan este número. Los geómetras diseñaron un complicado programa informático y volvieron con la respuesta. Sin embargo, los teóricos de cuerdas sospecharon que el resultado estaba equivocado, lo que sugería que el programa contenía un error. Cuando los geómetras lo revisaron, confirmaron que efectivamente así era. La pregunta es ¿cómo lo habían sabido los físicos?

Los teóricos de cuerdas ya habían estado trabajando en la forma de convertir ese problema geométrico en un problema físico. En el proceso, desarrollaron una forma de calcular de una sola vez el número de curvas de cada grado. Es difícil exagerar el impacto que esto causó en los círculos matemáticos. Era algo así como diseñar una forma de escalar todas y cada una de las montañas, independientemente de su altura.

En el contexto de la teoría cuántica tiene mucho sentido combinar el núme-

ro de curvas de cada grado en una única y elegante función. La interpretación física de esta función es inmediata: usando el principio de suma sobre historias puede interpretarse como la amplitud de probabilidad para una cuerda propagándose sobre el espacio de Calabi-Yau. Podemos pensar que la cuerda sondea todas las posibles curvas de cualquier grado al mismo tiempo, por lo que actúa como una supereficiente «calculadora cuántica».

Pero para encontrar la solución fue necesario añadir un segundo ingrediente, que consistía en hallar una formulación físicamente equivalente usando el espacio de Calabi-Yau especular. El término «especular» es engañosamente simple. A diferencia de la manera en la que un espejo refleja la imagen, en este caso el espacio original y su versión especular no solo tienen diferente forma, sino que ni siquiera comparten la misma topología. A pesar de esto, en el reino de la teoría cuántica los dos espacios poseen numerosas propiedades comunes. En particular, la propagación de una cuerda en ambos espacios resulta idéntica, con la ventaja de que lo que en la variedad original es un cálculo difícil resulta mucho más sencillo en la varie-



dad especular, donde se reduce a evaluar una única integral. *Et voilà!*

Dualidad de iguales

La simetría especular ilustra una poderosa propiedad de la teoría cuántica llamada dualidad: dos modelos clásicos pueden resultar equivalentes cuando los consideramos sistemas cuánticos, como si todas sus diferencias desapareciesen súbitamente al toque de una varita mágica. Las dualidades apuntan a profundas y misteriosas simetrías de la teoría cuántica subyacente. En general, no las entendemos bien y su existencia nos está diciendo que nuestra comprensión de la teoría cuántica es, en el mejor de los casos, incompleta [véase la serie «La interpretación de la mecánica cuántica», que comenzó en la revista de julio y finaliza en este número con el artículo de Adán Cabello en la página 56].

El primer y más famoso ejemplo de esta equivalencia es la conocida dualidad onda-partícula, que establece que cada partícula cuántica, por ejemplo el electrón, puede ser considerada como una partícula o como una onda. Ambos puntos de vista tienen sus ventajas y ofrecen diferentes perspectivas de un mismo fenómeno físico. El punto de vista «correcto» (partícula u onda) está determinado tan solo por la pregunta física que nos formulamos, no por la naturaleza del electrón. De una manera similar, los dos lados de la simetría especular ofrecen perspectivas duales e igualmente válidas sobre la «geometría cuántica».

Las matemáticas tienen una maravillosa habilidad para conectar mundos diferentes. En cualquier ecuación, el símbolo más frecuentemente pasado por alto es el modesto signo igual. Las ideas fluyen a través de él, como si el signo igual transmitiese la corriente eléctrica que ilumina un «¡ajá!» en nuestra mente. La doble línea indica que las ideas pueden fluir en las dos direcciones. Albert Einstein fue un maestro absoluto encontrando ecuaciones que ejemplifican esta propiedad. Pensemos en $E = mc^2$, sin duda la más famosa de la historia. En toda su modesta elegancia, conecta los conceptos físicos de masa y energía que antes de la formulación de la relatividad se concebían como totalmente diferentes. Gracias a la ecuación de Einstein sabemos que la masa puede ser transformada en energía y viceversa. Aunque menos famosas y pegadizas, las ecuaciones de Einstein de la relatividad general relacionan los

mundos de la geometría y de la materia de una manera igualmente sorprendente y bella. Una forma de resumir de un modo sucinto la relatividad general es diciendo que la masa le dice al espacio cómo curvarse y que, a su vez, el espacio le dice a la masa cómo moverse.

Las matemáticas tienen una maravillosa habilidad para conectar mundos diferentes

La simetría especular ofrece otro ejemplo del poder del signo igual, ya que es capaz de conectar dos mundos matemáticos diferentes: la geometría simpléctica (la rama de las matemáticas que subyace a gran parte de la mecánica clásica) y la geometría algebraica (el mundo de los números complejos). La física cuántica permite que las ideas fluyan libremente de un campo al otro y trae como consecuencia una inesperada «gran unificación» de estas dos disciplinas matemáticas.

Resulta reconfortante ver cómo las matemáticas han sido capaces de absorber gran parte de los razonamientos intuitivos y con frecuencia imprecisos de la mecánica cuántica y la teoría de cuerdas, y transformar muchas de estas ideas en enunciados rigurosos y demostraciones. Los matemáticos están próximos a aplicar este rigor a la simetría especular homológica, un programa que extiende en gran medida la idea original de la simetría especular en teoría de cuerdas. En cierto sentido, lo que intentan es escribir un diccionario completo de los objetos que aparecen en estos dos mundos matemáticos separados, incluidas todas las relaciones que satisfacen. Es curioso que estas demostraciones a menudo no sigan el camino sugerido por los argumentos físicos. Parece que el papel de los matemáticos no es el de limpiar el terreno una vez que los físicos han pasado por él. Más bien al contrario: en muchos casos, se han tenido que desarrollar nuevas líneas de pensamiento para llegar a las demostraciones. Es una prueba más de

la profunda, y todavía oculta, lógica que subyace a la teoría cuántica y, en último término, a la realidad.

A Niels Bohr le gustaba mucho la idea de complementariedad. Esta surgió de que, tal y como había probado Werner Heisenberg con su principio de incertidumbre, en mecánica cuántica uno puede medir el momento p de una partícula o su posición q , pero no los dos al mismo tiempo. Wolfgang Pauli resumió esta dualidad de forma recurrente en una carta dirigida a Heisenberg el 19 de octubre de 1926, pocas semanas después del descubrimiento del principio de incertidumbre: «Uno puede ver el mundo con el ojo p , o uno puede ver el mundo con el ojo q . Pero si uno abre ambos ojos, se vuelve loco».

En sus últimos años, Bohr intentó extender la idea de complementariedad a un ámbito filosófico mucho más amplio. Uno de sus pares complementarios favoritos fue el de verdad y claridad. Quizás el par formado por el rigor matemático y la intuición física pueda añadirse como otro ejemplo de dos cualidades mutuamente excluyentes. Se puede observar el mundo con un ojo matemático o con un ojo físico complementario, pero ¡ay de aquel que se atreva a abrir ambos ojos a la vez! 🧐

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



Quanta
magazine

PARA SABER MÁS

The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences.

Eugene Wigner en *Communications on Pure and Applied Mathematics* vol. 13, n.º 1, págs. 1-14, 1960.

A pair of Calabi-Yau manifolds as an exactly soluble superconformal theory.

Philip Candelas et al. en *Nuclear Physics*, vol. B359, pág. 21, 1991.

El universo elegante: Supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final.

Brian Greene. Booket Ciencia, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cultura contra cultura. ¿Matemáticas o física?

John Horgan en *lyC*, noviembre de 1993.

La irrazonable eficacia de las matemáticas.

Marco Livio en *lyC*, noviembre de 2011.



Combatir la malnutrición

No basta en aumentar la producción de alimentos. Son necesarios cambios en todo el sistema alimentario

El estado actual de la nutrición mundial está muy lejos de ser satisfactorio. Según la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas, 795 millones de personas pasan hambre; es decir, no tienen acceso a la comida suficiente para satisfacer los requisitos mínimos diarios de calorías. Dadas las dificultades para determinar esta cifra con exactitud, unido al hecho de que no incluye a quienes cubren el promedio mínimo anual de calorías pero no lo alcanzan en determinados momentos, esa cifra podría ascender a unos 1000 millones. Más difícil aún resulta estimar la cifra de personas que no consume los nutrientes suficientes, pero es probable que se encuentre entre los 2000 y 3000 millones. Las deficiencias de hierro, vitamina A, yodo y zinc son las más prevalentes. Paradójicamente, al menos 2000 millones de personas ingieren calorías en exceso, muchas de las cuales presentan también deficiencias nutricionales. Por malnutrición se suele entender alimentación escasa, pero en realidad significa alimentación de mala calidad.

La persistente negativa a reconocer que una persona malnutrida no es solo la que pasa hambre, sino también la que no consume los suficientes nutrientes y la que ingiere demasiadas calorías dificulta los esfuerzos por abordar el problema de manera integral. Es fundamental aumentar el suministro de alimentos para la gente que pasa hambre. Pero existe también una creciente preocupación por las consecuencias que tiene para la salud el consumo excesivo, en especial en forma de «calorías vacías» provenientes de alimentos que contienen grasas sólidas o azúcares añadidos pero poco o ningún nutriente. Casi todos los países del mundo afrontan el grave problema de que su población consume escasos alimentos nutritivos o demasiados alimentos hipercalóricos. Alrededor de la mitad de los habitantes del mundo encaja en una de estas dos categorías.



La malnutrición está más relacionada con los hábitos de consumo de calorías y nutrientes que con la producción de alimentos. Entre los factores que determinan el consumo se encuentran las preferencias de comida (como el sabor y la apariencia), la repartición (por ejemplo, quién come primero en casa), las normas culturales (tales como excluir ciertas comidas por razones religiosas) y las habilidades culinarias. Con todo, cabe afirmar que la más importante es la asequibilidad, que viene determinada tanto por el precio que establecen las empresas involucradas en el procesado, empaquetado, comercialización, transporte, almacenaje, publicidad y venta de los alimentos como por la capacidad de la gente para pagarlos. El aumento de la asequibilidad de los alimentos procesados y de alto contenido energético para la clase media emergente, junto con las aspiraciones de muchos por consumir una dieta más occidental, están convirtiendo la malnutrición en un problema mundial. Las dietas pobres constituyen la primera causa de morbilidad en el planeta.

La mayoría de los esfuerzos internacionales por mejorar la seguridad alimentaria tan solo se centran en el hambre y la desnutrición, de ahí la presión para aumentar la producción de alimentos. Pero este enfoque produccionista no resolverá todas las formas de malnutrición. Debería hacerse más hincapié en modificar los hábitos de consumo; identificar los problemas en el consumidor, al final de

la cadena de producción y distribución y trabajar desde él retrocediendo hasta el productor. Este enfoque no solo ayudará a localizar las raíces de la malnutrición; también servirá de aviso a los productores sobre el tipo de alimentos necesarios para solucionarla.

Pero incluso aunque centremos nuestra atención en el consumo, las soluciones distan mucho de ser sencillas. Cada actor implicado en el sistema alimentario (desde el productor primario hasta el minorista) tiene sus propias motivaciones y modos de interacción. El resultado es un cuadro altamente complejo que dificulta la aplicación de políticas, prácticas e intervenciones sociales efectivas para reducir la malnutrición. Es necesario tener en cuenta sinergias y contrapartidas en diferentes momentos y entre distintas zonas geográficas y jurisdicciones.

Los Gobiernos podrían definir las políticas alimentarias evaluando la probable eficacia y los costes de normativas, impuestos y subvenciones. Las compañías de alimentación podrían aplicarlo para implementar prácticas que mejoren el valor nutritivo y el impacto ambiental de sus productos sin menoscabo de la pujanza de sus empresas. Y las organizaciones no gubernamentales y los grupos de la sociedad civil pueden servir de él para desarrollar argumentarios de defensa o de presión más consistentes. Si queremos cumplir el objetivo de las Naciones Unidas de acabar con todas las formas de malnutrición en 2030, debemos reflexionar sobre el sistema alimentario en su totalidad. Un enfoque puramente produccionista no será suficiente; es necesario gestionar la demanda de comida, no solo satisfacerla. ■

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 544, pág. S17, 27 de abril de 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

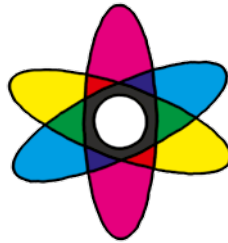
Con la colaboración de **nature**

El puzle de la teoría cuántica

¿Es posible zanjar científicamente el debate sobre la naturaleza del mundo cuántico?

Adán Cabello

Viñetas de Zach WeinerSmith para Investigación y Ciencia



Decía John Wheeler, director de tesis de Richard Feynman y en parte responsable de que Steven Weinberg se trasladase en 1982 a la Universidad de Texas en Austin: «La teoría cuántica no me preocupa en absoluto. Es simplemente la manera en que funciona el mundo. Lo que me corroe [...] es entender [...] de dónde viene». Wheeler, que

falleció en 2008, dedicó buena parte de su vida a buscar la respuesta a esta pregunta. Yo la reformularía así: ¿cómo tiene que ser un universo para que la teoría cuántica sea la herramienta predictiva más eficaz?

Hace poco, Weinberg ha confesado su preocupación por lo que considera «el problema de la mecánica cuántica» y por el futuro de la teoría [véase «El problema de la mecánica cuántica»,


EN SÍNTESIS

La mecánica cuántica choca con algunas de nuestras intuiciones más arraigadas acerca del mundo físico. A lo largo de la historia, esa situación ha generado un continuo debate acerca de su significado.


Un enfoque tradicional se ha basado en cuestionar el carácter intrínsecamente probabilístico de la teoría. Otros han defendido la necesidad de corregir sus ecuaciones fundamentales para incorporar el proceso de medición.

Una tercera opción consiste en aceptar la teoría cuántica tal y como es y preguntarse sobre su origen: ¿cómo debería ser un universo para que la teoría cuántica constituya la herramienta predictiva más eficaz?


La respuesta podría apuntar a un aspecto clave de la realidad física: el universo tal vez carezca de leyes que determinen las probabilidades de obtener un resultado u otro en un experimento.




ASÍ QUE PUEDE QUE
UNA PARTE DEL UNIVERSO
SEA ALEATORIA.
¿QUÉ HAY DE MALO
EN ELLO?



HUBO UN TIEMPO EN EL QUE
CREÍAMOS EN UN COSMOS
CENTRADO EN EL SER HUMANO.
HOY YA NO LO HACEMOS,
¡Y ESTAMOS BIEN!



TAMBIÉN
QUISIMOS
CREEN EN UN
UNIVERSO
GOBERNADO
SIEMPRE
POR LEYES
FUNDAMENTALES.
PERO PUEDE QUE
NO OCURRA ASÍ.
¿Y QUÉ?



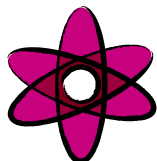
PODEMOS DEJAR DE SER
ESPECIALES. PODEMOS PRESCINDIR
DE LA IDEA DE QUE TODO
ESTÁ ORDENADO A UN NIVEL
FUNDAMENTAL.
PODEMOS HACER ESO...
¡Y NO SUCEDE
NADA TAN TERRIBLE!



¿Y ESTA SENSACIÓN DE PAVOR
EXISTENCIAL QUE SE ME
HA QUEDADO, QUÉ?

PERO, APARTE DE ESO,
¡TODO ESTÁ BIEN!

por Steven Weinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2017]. Ha desgranado qué aspectos de la teoría le incomodan y ha sugerido cómo cambiarla. A continuación me gustaría explicar en qué aspectos estoy de acuerdo con él y en cuáles no. Y, sobre todo, me gustaría sugerir cómo creo que deberíamos actuar para resolver este «problema» de una vez por todas.



ANTES DE PROSEGUIR, UN MATIZ SEMÁNTICO. Considero fundamental distinguir entre teoría cuántica y mecánica cuántica, pues dicha distinción resultará útil para identificar dónde, y dónde no, radica el problema.

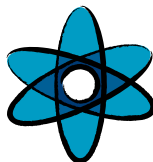
Como afirmaba Scott Aaronson en su libro *Quantum computing since Democritus* (Cambridge University Press, 2013), la teoría cuántica es una especie de «sistema operativo sobre el que [algunas] teorías físicas funcionan como *software* de aplicación». Per se, la teoría cuántica no es más que una teoría abstracta de probabilidades, la cual puede estudiarse —y debería enseñarse— desligada de su aplicación a problemas físicos. Esta teoría abstracta de probabilidades se basa en los siguientes axiomas:

- El *estado* de un sistema viene dado por una lista de probabilidades. Dichas probabilidades son las que un observador con capacidad para efectuar «medidas» sobre el sistema asigna a cada uno de los resultados posibles. Matemáticamente, ese estado se representa mediante un «rayo» (o dirección) en un espacio vectorial complejo. Todos los rayos corresponden a estados posibles. El «sistema» queda definido por el tipo de medidas que el observador puede hacer.
- Las *transformaciones reversibles* de dicho estado quedan representadas por cierta clase de objetos matemáticos, llamados operadores unitarios, los cuales actúan sobre el rayo que representa el estado. Todos los operadores unitarios corresponden a transformaciones reversibles posibles.
- Las *medidas* que un observador puede efectuar sobre el sistema quedan representadas por otra clase de operadores, llamados autoadjuntos, cuyas propiedades (sus «autovalores», en jerga técnica) determinan los posibles resultados de una medida. Todos los operadores autoadjuntos corresponden a medidas posibles.
- Para un estado inicial dado, la probabilidad de obtener un resultado específico se calcula mediante una regla propuesta por Max Born en 1926. El estado del sistema después de una medida ideal se obtiene aplicando una regla que el físico alemán Gerhart Lüders propuso en 1951.

Por otro lado, la mecánica cuántica constituye la aplicación de esta teoría abstracta de probabilidades a las moléculas, los átomos, los fotones y otros entes físicos.

Los ingredientes fundamentales en esta «capa extra de *software*» son tres: la ecuación de Schrödinger, la cual establece que el operador matemático asociado a la energía total es, además, el que determina cómo evoluciona el estado a lo largo del tiempo; las «reglas de cuantización» para convertir problemas de la física clásica en cuánticos, y las llamadas «reglas de superselección», las cuales impiden preparar determinados estados y realizar ciertas medidas (por ejemplo, una regla de superselección viene de la carga eléctrica: no es posible preparar un estado correspondiente a la superposición de dos estados con cargas eléctricas diferentes).

Adán Cabello es catedrático de física de la Universidad de Sevilla. Sus investigaciones se centran en los fundamentos de la física cuántica.



UNA DE LAS CRÍTICAS DE WEINBERG

es que «no parece haber ningún modo de situar la frontera entre los regímenes en los que [...] la mecánica cuántica puede aplicarse o no». No estoy de acuerdo. Desde la perspectiva de la teoría cuántica, la frontera está claramente definida: la establece la capacidad que tenga un observador para efectuar medidas. Para otro observador, equipado con otros aparatos que permitan resolver más o menos detalles, el límite se encontrará en otro sitio. Pero, para un observador con una capacidad experimental concreta, la frontera siempre está perfectamente definida.

Hay otro aspecto en el que la distinción entre teoría y mecánica cuántica resulta útil. Para Weinberg, el problema radica en que «en mecánica cuántica, la manera en que evoluciona la función de onda a lo largo del tiempo queda gobernada por una ecuación, la ecuación de Schrödinger, la cual no implica probabilidades». Por tanto, «¿cómo aparecen las probabilidades en mecánica cuántica?».

En la teoría cuántica, la función de onda es el estado del sistema, el cual es una lista de probabilidades. Poco importa cómo evolucione en el tiempo: sigue siendo una lista de probabilidades. Ergo, en realidad, no hay ningún problema con la mecánica cuántica, sino una pregunta a la que hemos de responder: ¿por qué la herramienta predictiva más eficaz de la que disponemos para describir el mundo es una teoría de probabilidades? Hay tres respuestas posibles.

SERIE

LA INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

PARTE 1

La charla. Por Scott Aaronson y Zach Weinersmith
(Julio de 2017)

Mecánica cuántica: interpretación y divulgación.
Por Adán Sus (Julio de 2017)

PARTE 2

El problema de la mecánica cuántica.
Por Steven Weinberg (Agosto de 2017)

PARTE 3

El puzle de la teoría cuántica. Por Adán Cabello
(págs. 56-61)

Primera: No es cierto que la mecánica cuántica sea una teoría de probabilidades. Existe una forma de verla como una teoría determinista consistente.

Segunda: No es cierto que la mecánica cuántica sea una teoría completa. Hay determinados aspectos (en particular, el proceso de la medición) que es necesario corregir.

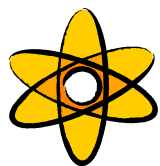
Tercera: El universo carece de leyes que determinen las probabilidades de los resultados de ciertas medidas. Un observador asigna probabilidades (es decir, un estado) a partir de la información que posee; pero ello no quiere decir que las probabilidades (el estado) sean objetivas. Ello obliga a que, para hacer predicciones, el observador tenga que adoptar una teoría de probabilidades que no asuma que dichas probabilidades estén predeterminadas. Desde esta perspectiva, la teoría cuántica sería simplemente la forma más eficaz de hacer comprensible lo incomprensible.

Dependiendo de cuál sea la respuesta correcta, los pasos que habremos de dar y el futuro de la mecánica cuántica serán distintos.

Coincido con Weinberg en que es una mala señal que, después de tantos años —estas cuestiones ya se debatían en 1926!—, los físicos sigan sin estar de acuerdo sobre el significado de la teoría. Comparto el análisis de que existen esencialmente dos posturas muy distintas, que él llama —inadecuadamente, en mi opinión— «realista» e «instrumentalista», para abordar el asunto. Y convengo también en que, hoy en día, ninguna de estas dos posturas resulta verdaderamente satisfactoria. Pero eso no quiere decir que ambas sean igualmente insatisfactorias. La postura realista puede asociarse con quienes creen que la respuesta a la pregunta anterior es la primera o la segunda, mientras la instrumentalista correspondería a quienes se decantan por la tercera.

Resulta habitual leer que es imposible zanjar esta discusión por métodos científicos y que, para ello, hemos de recurrir a un «juicio metafísico». No creo que sea así. No se trata de discutir apasionadamente cuál de estas opciones cada uno cree correcta ni de argumentar con cuál de ellas nos sentimos más cómodos o menos incómodos. Como veremos, ninguna de las respuestas pasa de ser un proyecto inacabado lleno de cabos sueltos. Se trata de examinar, científicamente, el estado real de cada uno de esos proyectos, identificar los problemas que plantean y, por último, resolverlos o demostrar que son irresolubles.

En lo que sigue intentaré resumir qué problemas creo que deberían abordarse antes de seguir perpetuando un debate que ya dura demasiado, que afecta al futuro de la física y, en concreto, a problemas tan fundamentales como el de extender la teoría cuántica a otros sistemas físicos, en particular a la gravedad.



COMENCEMOS CON LOS FÍSICOS A LOS QUE WEINBERG LLAMA «REALISTAS»

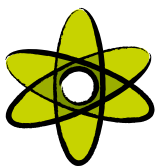
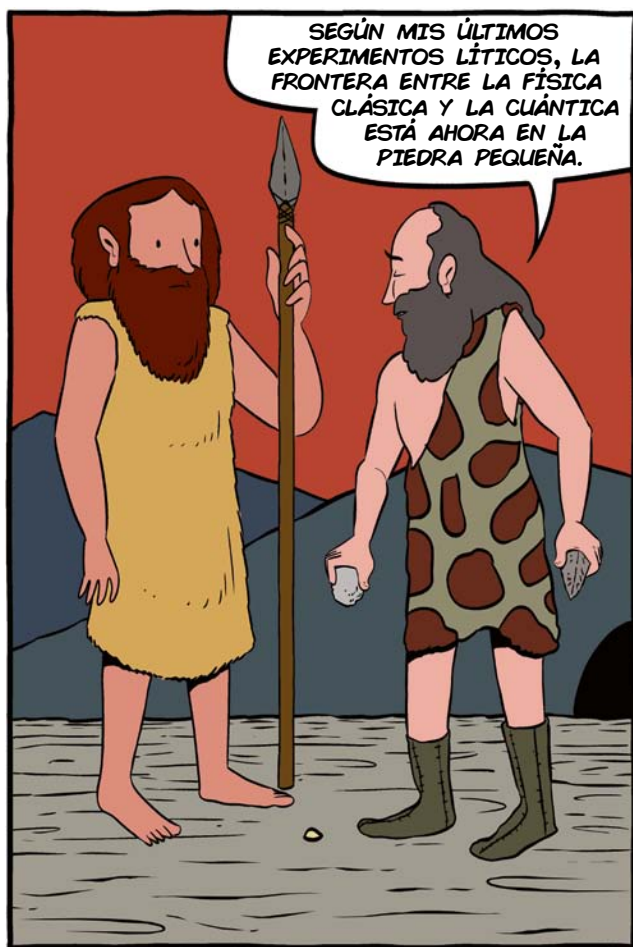
y a quienes yo prefiero denominar «propugnantes del realismo intrínseco». Son aquellos que defienden que las probabilidades de los resultados de las medidas están determinadas por propiedades intrínsecas al sistema observado. Los hay de dos tipos: quienes creen que la función de onda es, en sí misma, una propiedad intrínseca; y los que sostienen que la función de onda solo representa el conocimiento que posee un observador acerca de una realidad intrínseca subyacente. Weinberg solo se ocupa explícitamente de un subconjunto de los primeros: los defensores de la inter-

¿Y si la posición no es sino una propiedad emergente? ¿Cuál si no es el precio que hay que pagar por ser un constituyente elemental del universo? ¿Cómo van a ser estos constituyentes «elementales» y, a la vez, tener olor, sabor, color, posición y velocidad? ¿Y si el determinismo es también emergente?

pretación de los muchos mundos. Estos suscriben que existe una única función de onda del universo, la cual evoluciona de forma completamente determinista y de tal manera que, con cada medición, el universo se desdobra en tantas ramas desconectadas como resultados posibles hay.

La postura de los muchos mundos no constituye una solución, sino el comienzo de un programa de investigación que aún debe responder numerosas preguntas. ¿En qué sentido se desdoblan los universos? ¿Se desdoblan también las masas, las cargas eléctricas y el espaciotiempo? ¿Qué sistema de referencia define la función de onda universal? ¿Qué ocurre con la teoría de la relatividad? ¿Por qué no hay conexión entre los universos? ¿Y por qué en nuestro(s) universo(s) las probabilidades siguen la regla de Born? Los defensores de esta propuesta han de formular una teoría coherente que responda a todas estas preguntas. En ausencia de dicha teoría, la interpretación de los muchos mundos no es más que una solución *ad hoc* de dudosa consistencia y que poco nos dice de la naturaleza más allá de que, misteriosamente, permite la existencia de un número fantástico de universos. Tienen mucho trabajo por delante sus defensores.

No habla Weinberg de otras variantes realistas, como la mecánica bohmiana. Sin embargo, en todas ellas los problemas son similares y pueden resumirse como sigue: hasta ahora, nadie ha conseguido construir una teoría realista compatible con la relatividad especial de Einstein y que haga las mismas predicciones que la mecánica cuántica. Mucho peor: en 1964, John Bell demostró que todas las teorías realistas locales incluyen necesariamente predicciones que difieren de las de la mecánica cuántica. Predicciones que, según han demostrado los experimentos, no se cumplen en nuestro universo [véase «Un test de Bell sin escapatorias», por Carlos Abellán, Waldimar Amaya y Morgan W. Mitchell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2016].



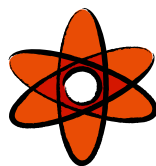
PASEMOS AHORA A QUIENES CONSIDERAN QUE LA OPCIÓN CORRECTA ES LA SEGUNDA, según la cual la mecánica cuántica no sería una teoría completa —Weinberg entre ellos, aunque sin mucho entusiasmo,

dicho sea de paso—. Esta postura se basa en la creencia de que los problemas con que se encuentran los defensores del realismo intrínseco podrán resolverse «corrigiendo» la mecánica cuántica: por ejemplo, añadiendo nuevos términos a la ecuación de Schrödinger.

La idea no es nueva. Su versión más conocida la hallamos en un modelo enunciado en 1986 por Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, de la Universidad de Trieste, el cual incluía un mecanismo físico de colapso espontáneo de la función de onda. En este espíritu, el propio Weinberg consideró en 1989 una clase de modificaciones no lineales de la mecánica cuántica.

Un problema de este enfoque reside en que hay muchas maneras de abordarlo, y ninguna de las que se han propuesto hasta ahora y que predicen diferencias con respecto a la mecánica cuántica ha pasado el filtro de los experimentos. Existen, además, problemas asociados a la consistencia lógica de las teorías resultantes.

Así pues, de nuevo nos hallamos más ante una línea de investigación abierta que ante una solución. También queda mucho trabajo por hacer en este frente, con la ventaja de que una parte de esa labor consiste en diseñar experimentos que validen o refuten tales propuestas.



VAYAMOS POR ÚLTIMO CON QUIENES WEINBERG LLAMA «INSTRUMENTALISTAS» y a quienes yo considero más adecuado denominar, por motivos que espero queden claros más adelante, «propugnantes del realismo participativo».

No estoy de acuerdo con Weinberg en que «según la postura instrumentalista, tendríamos que aceptar, como leyes fundamentales de la naturaleza, las reglas [...] sobre cómo usar la función de onda para calcular las probabilidades». En absoluto: lo que hemos de hacer es, como decía Wheeler, intentar comprender de dónde viene la teoría cuántica. Entender cómo tiene que ser un universo para que la teoría cuántica constituya la herramienta predictiva más eficaz.

En particular, antes de adoptar la postura instrumentalista, uno debería resolver el siguiente problema. Supongamos que la opción correcta es la tercera; es decir, que el universo carece de leyes que determinen las probabilidades de los resultados de ciertas medidas. Enfrentémonos al reto de construir una teoría predictiva en esa situación, a priori, tan adversa. ¿Es cierto que, bajo tales condiciones, la teoría cuántica proporciona la mejor herramienta predictiva?

Si fuésemos capaces de demostrar que la respuesta es afirmativa, habríamos aprendido mucho sobre el origen de la teoría cuántica. Y habríamos aprendido mucho sobre el universo. Lo que estoy proponiendo es una «derivación» o «reconstrucción» de la teoría cuántica, parecida a las que se han sugerido en los últimos años [véase «Teorías supracuánticas», por Miguel Navascués; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2016], pero asumiendo un modelo muy concreto de universo y un propósito muy concreto para la teoría.

Creo que se trata de un proyecto necesario y factible. Ello también explica por qué no comulgo con la etiqueta de «instrumentalista». El instrumentalismo es una posición filosófica que sostiene que las teorías científicas no han de intentar representar la realidad, sino que deben ser instrumentos para manejarse en el mundo. Esto puede parecer científicamente poco ambicioso si damos por sentado que la realidad se encuentra constituida por propiedades intrínsecas. Pero ¿qué sucede si la realidad no contiene leyes que dicten las probabilidades de los resultados de ciertas medidas? ¿Hace eso que la realidad sea «irreal»? ¿No parece mucho más sensato hacer la observación de que la realidad ofrece también este aspecto y buscar la mejor herramienta para desenvolverse? ¿Implica esto «renunciar a una meta fundamental de la ciencia», como afirma Weinberg? ¿No es más bien comenzar a entender un nuevo y fascinante aspecto de la realidad?

Desde esta perspectiva, decir que una de las alternativas es instrumentalista es contar la historia al revés. No hay ningún problema con la mecánica cuántica: la efectividad de la teoría es síntoma de un aspecto muy importante de la realidad. ¿Y en qué sentido la realidad es entonces «participativa»? En que en un universo así hay lugar para el libre albedrío: hay lugar para la decisión de efectuar una u otra medida, la cual puede afectar a la historia posterior del universo.

En cierto momento, Weinberg compara la aleatoriedad de la teoría cuántica con la impredecibilidad que, «en la práctica», exhibe «una cascada de gotas de lluvia». No creo que nos estemos enfrentando a un problema práctico de ignorancia, sino a algo que ocurre en la realidad. Los resultados de los experimentos cuánticos son tan absolutamente aleatorios que no existe teoría capaz de predecirlos. La teoría cuántica es un

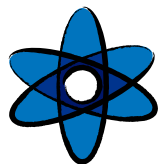
síntoma de que da igual cómo describamos el universo: nunca hallaremos en él «leyes» en el sentido usual de la física —idel siglo XIX!— que determinen las probabilidades de los resultados de esas medidas.

Encuentro que existe una flagrante contradicción entre la afirmación de Weinberg —y que yo comparto— de que «es un error exigir de manera demasiado estricta que las nuevas teorías físicas se ajusten a nuestros prejuicios filosóficos» y su veredicto posterior de que la postura instrumentalista «renuncia a una meta fundamental de la ciencia: describir qué ocurre realmente ahí fuera». ¿Y si algunas de las cosas que realmente ocurren «ahí fuera» no están gobernadas por leyes como las que permiten predecir la posición de una canica conocidas su posición y velocidad iniciales? ¿Y si la posición, al igual que la temperatura, no es sino una propiedad emergente? ¿Cuál si no es el precio que hay que pagar por ser un constituyente elemental del universo? ¿Cómo van a ser estos constituyentes «elementales» y, a la vez, tener olor, sabor, color, posición y velocidad? ¿Y si el determinismo es también emergente?

Lo que estoy proponiendo es una «derivación» o «reconstrucción» de la teoría cuántica, parecida a las que se han sugerido en los últimos años, pero asumiendo un modelo muy concreto de universo y un propósito muy concreto para la teoría

Comparto la opinión de Wheeler de que no hay que cambiar nada de la teoría cuántica. Y ello por el mismo motivo por el que no hay que cambiar nada de la teoría clásica de la probabilidad: no hay nada incorrecto en ellas. Simplemente, hay situaciones en las que una es la más adecuada y situaciones en las que lo es la otra.

No obstante todo lo anterior, es igualmente cierto que también los proponentes del realismo participativo tienen mucho trabajo por delante.



SOLO SE ME OCURREN DOS MANERAS

de alcanzar ese idílico consenso científico que nos permita avanzar: o bien formulando una teoría coherente que vaya más allá de la mecánica cuántica y comprobando que sus predicciones se cumplen en los experimentos; o bien demostrando que tal teoría no puede existir y que, en un universo en el que no existen leyes que determinen las probabilidades de los resultados de ciertas medidas, la herramienta predictiva más eficaz es la teoría cuántica.

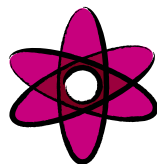
SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Fronteras de la física cuántica*, uno de los últimos números de nuestra colección TEMAS, en el que 17 expertos exponen con gran rigor algunos de los retos físicos y epistemológicos que aún afronta una de las teorías más profundas y fascinantes de todos los tiempos.




www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/86

Un punto psicológico y sociológico que se me escapa es por qué a tantos científicos del siglo XXI les cuesta renunciar al determinismo. Ya en el siglo XIII, incluso un pensador tan apegado a la idea de un dios rector del universo como Tomás de Aquino apuntaba que un universo no sería «perfecto» sin aleatoriedad.



EN 1964, FEYNMAN IMPARTIÓ una célebre serie de conferencias en Cornell. En una de ellas, poco después de pronunciar una de las frases que con el tiempo acabarían siendo más citadas («creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica»), añadió: «No insistan en preguntarse [...] “¿cómo es posible?”, porque se meterán en un callejón del que nadie ha conseguido salir todavía. Nadie sabe cómo es posible».

Este consejo siempre me ha parecido una barbaridad. Al contrario: no hay que dejar nunca de preguntarse cómo es posible. Sobre todo porque, como diría Wheeler, «detrás seguramente yace una idea tan sencilla, tan bella y tan convincente que, cuando la comprendamos, dentro de una década, un siglo o un milenio, nos diremos: ¿cómo podía no ser así? ¿Cómo hemos sido tan estúpidos durante tanto tiempo?». 

PARA SABER MÁS

How come the quantum? John A. Wheeler en «New techniques and ideas in quantum measurement theory», *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 480, págs. 304-316, diciembre de 1986.

Perfiles cuánticos: Un análisis de la física cuántica. Jeremy Bernstein. McGraw-Hill, 1991.

On participatory realism. Christopher Fuchs en *Information and interaction: Eddington, Wheeler and the limits of knowledge*, dirigido por Ian T. Durham and Dean Rickles. Springer, 2017. Disponible en arxiv.org/abs/1601.04360

The universe would not be perfect without randomness: A quantum physicist's reading of Aquinas. Valerio Scarani en *Quantum [un]speakables II: Half a century of Bell's theorem*, dirigido por Reinhold Bertlmann y Anton Zeilinger. Springer, 2017. Disponible en arxiv.org/abs/1501.00769

Interpretations of quantum theory: A map of madness. Adán Cabello en *What is quantum information?*, dirigido por Olimpia Lombardi, Sebastian Fortin, Federico Holik y Cristian López. Cambridge University Press, 2017. Disponible en arxiv.org/abs/1509.04711

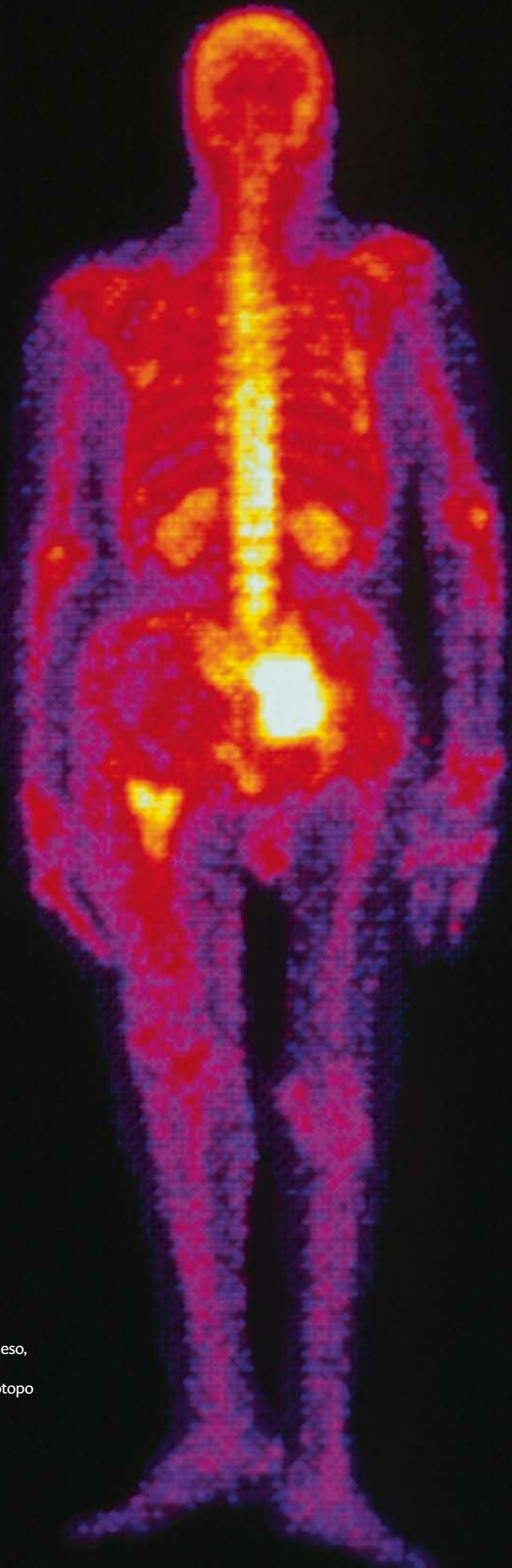
EN NUESTRO ARCHIVO

John A. Wheeler: ¿qué es la realidad? Entrevista y esbozo biográfico: *IyC*, julio de 1991.

Cien años de misterios cuánticos. Max Tegmark y John A. Wheeler en *IyC*, abril de 2001.

Bayesianismo cuántico. Hans Christian von Baeyer en *IyC*, agosto de 2013.

Teorías supracuánticas. Miguel Navascués en *IyC*, septiembre de 2016.



LOS ESCÁNERES realizados para detectar cáncer de tiroides o de hueso, como el mostrado en esta imagen, dependen del tecnecio 99m, un isótopo radiactivo poco común.

ESCÁÑERES CIEGOS

Millones de pacientes en todo el mundo dependen del tecnecio 99m, un exótico isótopo radiactivo que permite tomar imágenes médicas. Sin embargo, los viejos reactores nucleares que lo producían se están clausurando

Mark Peplow

El hombre a través de cuyas venas fluyen átomos radiactivos parece tranquilo. Se tumba sobre una camilla y permanece inmóvil mientras esta se introduce en un escáner con forma de rosquilla en el Hospital General de Vancouver. Le duele mucho el pie. El aparato obtiene nítidas imágenes tridimensionales de huesos y tejidos blandos mediante una cámara que capta la radiación, la cual brilla con mayor intensidad allí donde hay un aumento de la circulación sanguínea.

La técnica no solo sirve para iluminar pies. Más de 30 millones de veces al año, en todo el mundo, estos escáneres examinan corazones dañados, detectan cánceres mortales y exploran cerebros devastados por un ictus. Las imágenes dependen del tecnecio 99m, un isótopo poco conocido pero necesario para la tomografía computarizada por emisión de fotón único. El tecnecio inyectado brinda a los médicos una incomparable ventana al interior del cuerpo humano. Estas imágenes pueden mostrar detalles más sutiles que otras pruebas, y la dosis de radiación resulta extremadamente baja y segura.

Pero esta valiosa técnica corre peligro. Los átomos radiactivos que circulan por el pie del paciente iniciaron su andadura en un viejo reactor nuclear en Chalk River, en Ontario, a miles de kilómetros de distancia. Sin embargo, la instalación dejó de fabricar el material originario del isótopo el 31 de octubre de 2016. En aquel momento desapareció el 20 por ciento de la

producción mundial de este recurso médico y Norteamérica perdió su única fuente de abastecimiento local. Chalk River se apagará completamente dentro de pocos años, y el problema sigue empeorando.

Casi todo el suministro mundial proviene de solo seis reactores de investigación. Cuatro de ellos tienen más de 50 años de antigüedad y son cada vez más propensos a sufrir averías. Un reactor en Bélgica y otro en los Países Bajos representan hoy la mitad de la capacidad global, pero ambos se clausurarán en el próximo decenio. Hay planes para construir nuevas centrales nucleares, pero puede que tarden más de diez años en completarse. En septiembre de 2016, las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU. dieron la voz de alarma en un informe que alertaba sobre un riesgo «considerable» de escasez de tecnecio en el futuro cercano.

Los médicos están preocupados. «Se trata de algo que necesitamos a diario», señala Eric Turcotte, especialista en medicina nuclear de la Universidad de Sherbrooke, en Quebec. Estas pruebas revisten especial utilidad a la hora de detectar cánceres de hueso o fracturas, así como para descubrir obstrucciones en las arterias de pacientes con problemas cardíacos. A menudo se someten a ellas personas con dolor torácico u otros signos de enfermedades cardiovasculares. Otras técnicas generan imágenes más borrosas o aplican dosis más elevadas de radiación,

EN SÍNTESIS

Un elemento radioactivo poco conocido, el tecnecio 99m, resulta esencial para cierto tipo de escáneres médicos.

El cierre de los envejecidos reactores nucleares que lo producen está amenazando el suministro mundial de este radiofármaco.

Los investigadores intentan desarrollar nuevos métodos de producción basados en aceleradores de partículas y otros aparatos.



Mark Peplow es periodista científico. Doctor en química, cubre temas relacionados con la física, ciencia de materiales, energía y medioambiente.

lo que conlleva un peligro mayor. Benjamin Chow, del Instituto de Cardiología de la Universidad de Ottawa, asegura que una escasez del radiofármaco obligaría a los médicos a recurrir a métodos menos precisos o incluso a prescindir de las pruebas.

Peor aún: la escasez de sitios de producción crea una cadena de suministro muy frágil. Casi todos los isótopos se desintegran en un día y no pueden almacenarse. Cada dosis administrada a un paciente ha de ser extraída poco antes de un recipiente con el isótopo fuente, molibdeno 99. Este es más duradero y sus muestras deben transportarse por vía aérea cada pocos días desde los reactores que lo fabrican, en el otro extremo del mundo. Unas malas condiciones atmosféricas o la cancelación de un vuelo pueden traducirse en un escáner sin realizar. «Piense en lo vulnerable que somos al cierre de un aeropuerto», se lamenta François Bénard, de la Agencia del Cáncer de la Columbia Británica.

Pero el ciclo de producción del isótopo plantea otro grave problema: el terrorismo nuclear. Para crear molibdeno 99, la mayoría de los reactores se alimentan de uranio altamente enriquecido de grado militar. Existe un esfuerzo global para abandonar el uso de esta forma de uranio, a fin de impedir que grupos peligrosos puedan robarlo. Sin embargo, transformar las instalaciones para que puedan usar uranio de bajo enriquecimiento implica un mayor período de inactividad, con la desventaja añadida de que tales reactores producen menos molibdeno 99.

Investigadores de EE.UU. y Canadá han comenzado una carrera para desarrollar nuevas técnicas de obtención de molibdeno 99 y tecnecio 99m mediante aceleradores de partículas y otras máquinas. Estas no solo evitarían la escasez de isótopos, sino que resultarían más baratas y generarían menos residuos radiactivos. Ahora, dada la brusca caída de la producción global, los expertos están a un paso de averiguar si sus alternativas se hallan o no a la altura del desafío.

ESCASEZ PREOCUPANTE

Los médicos ya tienen una amarga experiencia con lo que ocurre cuando se agota el molibdeno 99. En 2009 y 2010, el reactor canadiense y el neerlandés permanecieron desconectados durante largos períodos, lo que provocó una escasez mundial del radiofármaco que obligó a los médicos a buscar pruebas diagnósticas alternativas. «La crisis de 2009 supuso un toque de atención para todos», comenta Sally Schwarz, presidenta de la Sociedad de Medicina Nuclear e Imagen Molecular. «No pudieron realizarse exámenes diagnósticos y los pacientes sufrieron. No queremos volver a vernos en esa situación.»

Una opción habitual en pruebas cardíacas consiste en sustituir el tecnecio 99m por otro radioisótopo, el talio 201. Sin embargo, esta especie genera imágenes más borrosas y duplica la dosis de radiación recibida por el paciente, explica Venkatesh L. Murthy, especialista de la Universidad de Michigan. Otros métodos no radiactivos, como la ecocardiografía, no son tan precisos. El tecnecio 99m logra un delicado balance entre resolución, seguridad y coste, apunta.

Poco después, el Gobierno canadiense inició el Programa de Aceleración de Tecnología Isotópica (ITAP, por sus siglas en inglés). Con un presupuesto de 45 millones de dólares, esta iniciativa busca desarrollar nuevos métodos de obtención de tecnecio 99m. Su proyecto principal podría entrar en funcionamiento a finales de este año.

En lugar de una enorme planta nuclear, la nueva técnica emplea un ciclotrón: un pequeño acelerador de partículas que puede instalarse en el sótano de un hospital. La máquina lanza protones contra un blanco de molibdeno 100 y produce así tec-

necio 99m, aunque su corta vida implica que un mismo ciclotrón solo podrá abastecer un área limitada. No obstante, la mayoría de las grandes ciudades de Canadá ya disponen de máquinas similares, por lo que debería ser posible extender esta solución a todo el país, observa Paul Schaffer, director adjunto de laboratorio y exdirector de la división de medicina nuclear del TRIUMF, el centro nacional canadiense de física de aceleradores, donde se desarrolló el método. Ubicado en Vancouver, este laboratorio llevó a cabo pruebas piloto para demostrar que, en seis horas de funcionamiento, el ciclotrón podía producir tecnecio 99m en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de los casi cinco millones de habitantes de la Columbia Británica: unos 500 escáneres al día.

El ciclotrón, con un diámetro de dos metros, se halla ahora en una cámara tras una gruesa puerta de acero en las instalaciones que la Agencia del Cáncer tiene en Vancouver. Dos tubos finos de metal sobresalen de la máquina y transportan haces de protones que viajan a una quinta parte de la velocidad de la luz. En el otro extremo se encuentra el blanco: una placa plana y delgada, de unos 10 centímetros de largo, con un recubrimiento de molibdeno 100 y alojada en un cilindro de aluminio. La placa se bombardea durante seis horas para transformar parte del molibdeno 100 en tecnecio 99m. A continuación, este procede a través de un conducto hasta la «celda caliente», un recinto blindado con plomo, donde los operadores lo separan y purifican. El resultado es un pequeño vial de líquido transparente con tecnecio 99m para cientos de pruebas.

El Hospital General de Vancouver y la Agencia del Cáncer están concluyendo un ensayo clínico en el que han usado este tecnecio en pruebas con pacientes. El proceso de generación suele empezar a primera hora de la mañana y las inyecciones se administran a partir de la una de la tarde. Hasta ahora, los resultados indican que el isótopo obtenido en el ciclotrón es tan seguro y eficaz como el generado en los contenedores de molibdeno 99.

El año pasado, el TRIUMF y otros socios del programa ITAP fundaron una compañía para proveer de esta tecnología a otras instalaciones. Alrededor de 500 ciclotrones médicos en todo el mundo ya generan haces de potencia suficiente para fabricar tecnecio 99m, además de para sus tareas actuales, como crear isótopos para tomografías por emisión de positrones. Esa base supone toda una ventaja, explica Schaffer: reacondicionar un aparato existente cuesta diez veces menos que un ciclotrón médico nuevo, cuyo precio ronda los 5 millones de dólares. En 2014, la Sociedad Británica de Medicina Nuclear recomendó esta técnica como la más adecuada para suministrar tecnecio 99m. Schaffer calcula que entre 12 y 24 ciclotrones podrían bastar para satisfacer las necesidades de todo Canadá.

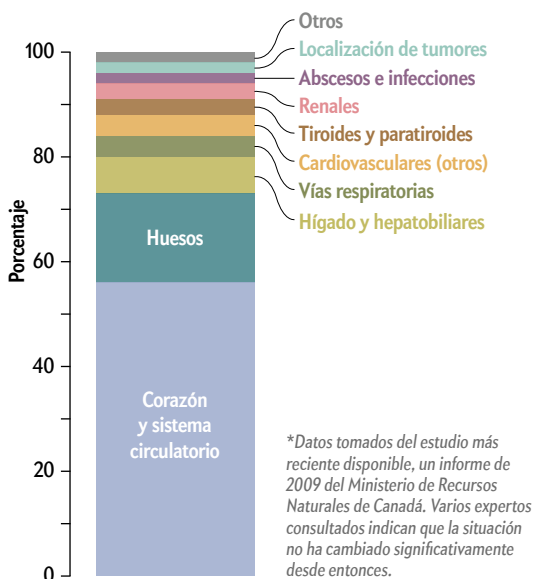
OTRAS TÉCNICAS

En EE.UU. los ciclotrones no generan tanto entusiasmo. El problema, indica Schaffer, radica en que los hospitales estadounidenses fueron de los primeros que construyeron ciclotrones para aplicaciones médicas, por lo que sus modelos, más antiguos, no pueden alcanzar los niveles de energía requeridos.

La Administración Nacional de Seguridad Nuclear de EE.UU. está respaldando a compañías que apuestan por otro tipo de

Usos vitales

El tecnecio 99m se usa en unos 30 millones de escáneres al año en todo el mundo. Más de la mitad sirven para diagnosticar problemas potencialmente mortales de corazón o de los vasos sanguíneos. También pueden detectar cánceres óseos, enfermedades renales y otras*.



aparatos. Una empresa de Wisconsin, NorthStar Medical Radioisotopes, espera usar un acelerador lineal de electrones para generar rayos X. Estos pueden extraer un neutrón del molibdeno 100 y transformarlo así en molibdeno 99, que a su vez se desintegra en tecnecio. Resulta más fácil obtener una licencia para un acelerador lineal que para un reactor nuclear; además, cuestan menos que los ciclotrones y se pueden adquirir «en el mercado», observa Carl Ross, físico retirado del Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Canadian Isotope Innovations, una compañía derivada del ITAP, está adoptando un enfoque similar, aunque no se encuentra en una fase tan avanzada.

Sin embargo, y a pesar de todas sus ventajas, los aceleradores lineales estándar producen una menor concentración de molibdeno 99 que los reactores nucleares. Por ello, NorthStar ha desarrollado un proceso completamente nuevo para separar el tecnecio 99m de la mezcla de isótopos de molibdeno que sale de sus aceleradores. El sistema, llamado RadioGenix, bombea la mezcla a través de una columna de resina que solo absorbe el tecnecio. Los isótopos de molibdeno pueden entonces reutilizarse en otro ciclo de producción y el tecnecio puro se recupera de la columna mediante un lavado con solución salina. La empresa confía en que el sistema se apruebe para uso clínico este año.

Otra alternativa, quizá la más radical, procede de SHINE Medical Technologies, una empresa de Wisconsin que pretende obtener molibdeno 99 bombardeando uranio de bajo enriquecimiento con neutrones. Estos proceden de un acelerador lineal en el que se fusionan deuterio y tritio para formar helio. Ese proceso libera neutrones que, a su vez, pueden desencadenar reacciones de fisión en el blanco de uranio. La empresa afirma que el método genera concentraciones de molibdeno 99 que

resultan compatibles con los sistemas existentes para transportar el isótopo y separar el tecnecio 99m. En febrero de 2016, SHINE consiguió la aprobación de la Comisión de Regulación Nuclear de EE.UU. para construir su planta de producción y espera comenzar la distribución en 2020.

EL RETO DEL MERCADO

Pero, por sí sola, la tecnología no supone una garantía de éxito. Los costes también desempeñarán un papel. «Hay que fabricar el producto a un precio competitivo para que los hospitales lo acepten», declara Bénard.

En Norteamérica y con los métodos actuales, el tecnecio 99m cuesta entre 20 y 25 dólares por dosis. Pero esa cifra es muy inferior al verdadero coste de producción, en parte porque los Gobiernos ya pagaban un buen porcentaje por el combustible de los reactores nucleares, la gestión de residuos y la inversión inicial para la construcción de los propios reactores. «Nos volvimos adictos a las subvenciones de los Gobiernos», admite Schaffer. «Ese modelo es insostenible.»

Con las nuevas técnicas y con un control más privado del suministro, fabricantes y Gobiernos planean fijar un precio para el tecnecio que cubra los gastos de mantenimiento de toda la cadena. Schaffer asegura que, en los próximos años, los hospitales de la Columbia Británica habrán de prepararse para una subida del 40 por ciento.

Fijar los precios basándose en la recuperación total de los costes ayudaría a las empresas emergentes a despegar y mantenerse. Sin embargo, hay pronósticos opuestos. Por un lado, el envejecimiento de los países desarrollados debería aumentar la demanda de la clase de pruebas cardíacas en las que destaca el tecnecio 99m; además, el mercado chino está creciendo con rapidez. Pero, por otro, en los últimos años la demanda de tecnecio 99m ha disminuido en muchos países, según la OCDE. ¿El motivo? La escasez de los años 2009 y 2010 incitó a los hospitales a reducir la cantidad de isótopo en cada dosis; al mismo tiempo, la calidad de las imágenes pudo mantenerse gracias a mejoras en los programas informáticos. Como consecuencia, la OCDE prevé que, si entran en marcha los nuevos reactores y los demás métodos, podría producirse un exceso de oferta y un descenso de los precios para 2021.

De todas formas, muchos expertos no están convencidos de que los nuevos reactores que reemplazarán a los viejos vayan a alcanzar la capacidad exigida en el plazo previsto. «Si dependemos solo de los reactores nucleares, volveremos a tener problemas», augura Bénard. En su opinión, continuar con estos métodos de imagen dependerá de que las nuevas técnicas salgan a escena.

PARA SABER MÁS

Lessons from the Tc-99m shortage: Implications of substituting Tl-201 for Tc-99m single-photon emission computed tomography. Gary R. Small et al. en *Circulation: Cardiovascular Imaging*, vol. 6, n.º 5, págs. 683-691, septiembre de 2013.

Cardiac stress testing and the radiotracer supply chain: Nuclear freeze. Venkatesh L. Murthy et al. en *JAMA Cardiology*, vol. 1, n.º 5, págs. 616-617, agosto de 2016.

Molybdenum-99 for medical imaging. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. National Academies Press, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Tomografía por emisión de positrones. Michel M. Ter-Pogossian, Marcus E. Raichle y Burton E. Sobel en *lyC*, diciembre de 1980.



INTELIGENCIA ARTIFICIAL

HACIA UNA INTE MÁS HUMANA

EN SÍNTESIS

¿Cómo saben los niños pequeños lo que saben? Esta pregunta ha inquietado durante largo tiempo a filósofos y psicólogos. Ahora, también ocupa a los expertos en computación.

Los especialistas en inteligencia artificial están estudiando la manera en que razonan los niños con el objetivo de enseñar a las máquinas a comprender el mundo.

Dos estrategias complementarias de aprendizaje automático —tímidos intentos de remedar lo que los pequeños hacen de forma natural— han comenzado a transformar la inteligencia artificial.



LIGENCIA ARTIFICIAL

Las máquinas están empezando a incorporar lo que sabemos acerca de la manera en que los niños aprenden sobre el mundo

Alison Gopnik



Alison Gopnik es catedrática de psicología y profesora asociada de filosofía en la Universidad de California en Berkeley. Su investigación se centra en el modo en que los niños aprenden sobre el mundo.



SI UNO PASA MUCHO TIEMPO CON NIÑOS, TERMINARÁ PREGUNTÁNDOSE CÓMO es posible que estos jóvenes seres humanos sean capaces de aprender tantas cosas con tanta rapidez. Los filósofos, ya desde la época de Platón, se han planteado la misma cuestión, pero nunca han hallado una respuesta satisfactoria. Mi nieto de cinco años, Augie, sabe de plantas, animales y relojes, por no hablar de dinosaurios y naves espaciales. También entiende lo que otras personas desean y la manera en que piensan y sienten. Y sabe usar todo ese conocimiento para clasificar cuanto ve y oye y realizar predicciones. Por ejemplo, hace poco declaró que una especie de titanosaurio recién descubierta y que se exhibe en el Museo de Historia Natural de Nueva York se alimentaba de plantas, por lo que en realidad el animal no daba tanto miedo.

Sin embargo, los estímulos que Augie recibe del entorno se reducen a una corriente de fotones que inciden sobre la retina y a perturbaciones del aire en contacto con los tímpanos. De algún modo, el ordenador neural que se esconde tras sus ojos azules se las ingenia para procesar la limitada información que captan sus sentidos y usarla para efectuar predicciones sobre titanosaurios herbívoros. Una pregunta persistente es si los ordenadores electrónicos pueden hacer lo mismo.

Durante los últimos quince años, los teóricos de la computación y los psicólogos han tratado de hallar una respuesta a dicha cuestión. Los niños adquieren una inmensa cantidad de conocimientos con una pequeña aportación por parte de padres y profesores. A pesar de los enormes progresos efectuados en inteligencia artificial (IA), ni siquiera los ordenadores más potentes pueden igualar aún la capacidad de aprendizaje de un niño de cinco años.

Descifrar el funcionamiento del cerebro infantil y crear luego una versión digital que opere con idéntica eficacia supondrá un desafío para los científicos computacionales durante los próximos decenios. Pero, mientras tanto, ya están comenzando a desarrollarse las primeras máquinas que integran parte de lo que sabemos acerca de cómo aprendemos los humanos.

DOS ENFOQUES

Tras un primer estallido de entusiasmo en los años cincuenta y sesenta del siglo xx, con el tiempo la IA comenzó a languidecer. En los últimos años, sin embargo, varios avances de primer orden, sobre todo en el campo del aprendizaje automático, han vuelto a poner a la IA en el primer plano tecnológico. Como consecuencia, han surgido multitud de predicciones, tanto utópicas como apocalípticas, acerca de sus implicaciones. De manera bastante literal, se ha llegado a presagiar desde la inmortalidad hasta el fin del mundo, y mucho se ha escrito sobre ambas posibilidades.

Sospecho que los adelantos en IA conducen a sentimientos tan intensos debido a nuestro arraigado temor a todo aquello que sea casi humano. La idea de que puedan existir criaturas capaces de salvar la brecha entre lo humano y lo artificial ha

resultado siempre profundamente perturbadora, desde el gólem medieval y el monstruo de Frankenstein hasta Ava, la *femme fatale* robótica de la película *Ex machina*.

Pero ¿puede un ordenador aprender igual que un ser humano? ¿Cuánto de toda esa acalorada retórica apunta a un cambio revolucionario y cuánto se queda en un exceso de euforia? Los detalles del proceso mediante el cual un ordenador aprende a reconocer, por ejemplo, un gato, una palabra hablada o un carácter del alfabeto japonés pueden resultar difíciles de seguir. Sin embargo, tras un examen minucioso, los principios fundamentales que subyacen al aprendizaje automático no son tan desconcertantes como podría parecer a simple vista.

Una de las estrategias propuestas para solucionar el problema toma como punto de partida las corrientes de fotones y las vibraciones del aire que Augie y todos nosotros recibimos (y que al ordenador llegan en forma de píxeles y registros de audio) y trata de identificar pautas en los datos que permitan detectar e identificar objetos en el mundo circundante. Esta forma de atacar el problema «de abajo arriba» tiene sus raíces en las ideas de filósofos como David Hume y John Stuart Mill y psicólogos como Iván Pávlov y B. F. Skinner, entre otros.

En los años ochenta surgió una ingeniosa manera de aplicar este enfoque para conseguir que los ordenadores identificasen pautas entre los datos. Los sistemas basados en redes neuronales, o conexionistas, se inspiran en la forma en que las neuronas convierten las señales luminosas de la retina en representaciones del mundo que nos rodea. De modo similar a lo que ocurre con las células, las unidades de procesamiento de una red neuronal se hallan interconectadas y organizadas en capas. Los píxeles de una capa se van transformando en representaciones cada vez más abstractas (como una nariz o un rostro completo) a medida que los datos se manipulan y se van transfiriendo a capas superiores.

En tiempos recientes, el interés por las redes neuronales ha experimentado un renovado auge debido a las técnicas de aprendizaje profundo, hoy comercializadas por Google, Facebook y otros gigantes tecnológicos. Al renovado éxito de estos sistemas han contribuido tanto la creciente potencia de los ordenadores

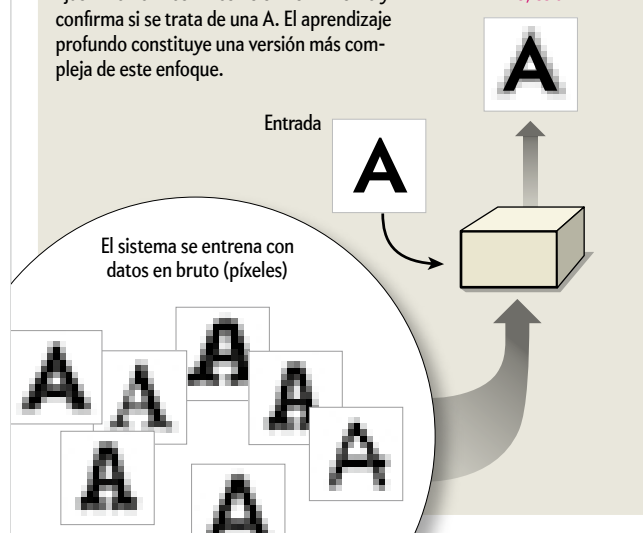
Dos vías hacia la inteligencia artificial

Numerosos problemas que un niño de cinco años resuelve sin dificultad constituyen verdaderos retos incluso para los ordenadores más potentes. En los últimos años, la inteligencia artificial se ha inspirado en la manera en que aprenden los niños para enseñar a las máquinas a comprender el mundo. Por ejemplo, un ordenador puede reconocer una letra, bien a partir de la información sensorial en bruto (izquierda), bien mediante conjeturas basadas en un conocimiento preexistente (derecha).

«De abajo arriba» (aprendizaje profundo)

A partir de múltiples ejemplos de la letra A, un ordenador aprende a distinguir patrones de píxeles claros y oscuros en diferentes versiones de la letra. Cuando la máquina recibe una nueva entrada, evalúa si los píxeles se ajustan o no a los datos de entrenamiento y confirma si se trata de una A. El aprendizaje profundo constituye una versión más compleja de este enfoque.

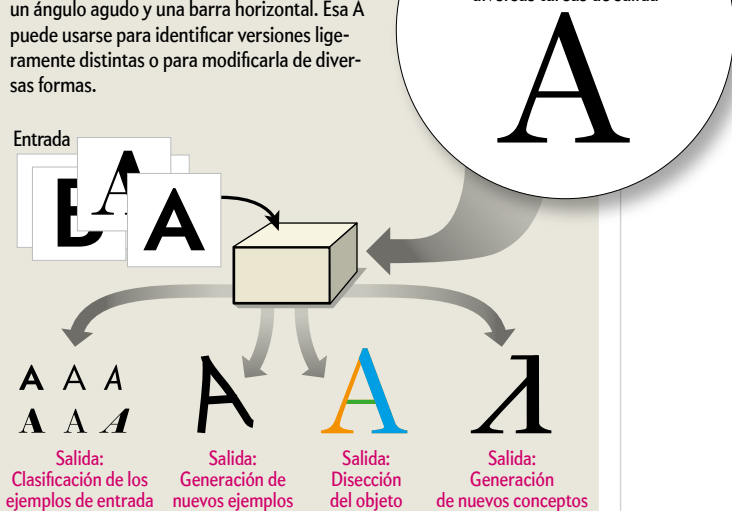
Salida: Píxel a píxel, este carácter se asemeja a los datos en bruto recibidos durante entrenamiento; por tanto, es una A



«De arriba abajo» (métodos bayesianos)

Con métodos bayesianos, un único ejemplo de la letra A basta para reconocer signos similares. La máquina construye un modelo de la letra a partir de su propia biblioteca interna de «componentes» y elabora una figura que consta de un ángulo agudo y una barra horizontal. Esa A puede usarse para identificar versiones ligeramente distintas o para modificarla de diversas formas.

El sistema se entrena con un solo ejemplo de un concepto nuevo, suficiente para ejecutar diversas tareas de salida



(el aumento exponencial que dicta la célebre ley de Moore) como la posibilidad de acceder a descomunales conjuntos de datos. Gracias a estos dos factores, los sistemas conexionistas actuales son capaces de aprender con una eficacia que supera cualquier expectativa pasada.

A lo largo de los años, la comunidad de IA ha oscilado entre emplear este tipo de técnicas y las que proceden en sentido contrario: de arriba abajo. Estas últimas se basan en usar el conocimiento que ya posee un sistema y explotarlo para aprender algo nuevo. Platón y los filósofos racionalistas, como Descartes, defendían esta visión del aprendizaje, lo que desempeñó un papel importante en los albores de la IA. En la primera década de este siglo, tales métodos han vivido su propio renacimiento en forma de modelos probabilísticos, o bayesianos.

Al igual que un científico, un sistema que opera de forma descendente comienza formulando hipótesis abstractas y amplias acerca del mundo. A continuación, pronostica cómo deberían ser los datos en el caso de que sus hipótesis fuesen correctas y, dependiendo del resultado —y, una vez más, como haría un científico— revisa y actualiza las suposiciones iniciales.

EL CAMINO HACIA ARRIBA

Las técnicas que proceden de abajo arriba tal vez resulten más fáciles de entender, por lo que comenzaremos por ellas. Imagine que desea que su ordenador aprenda a separar los mensajes legítimos del correo basura. Usted tal vez se haya percatado de que estos mensajes no deseados tienden a presentar rasgos

distintivos: una larga lista de destinatarios, una dirección con origen en Nigeria o Bulgaria, insinuaciones a un premio de un millón de dólares o menciones a Viagra. Sin embargo, cabe la posibilidad de que un correo legítimo presente el mismo aspecto. Y usted no desearía descartar un mensaje en el que se le informa de que ha logrado un ascenso o un premio académico.

Si compara suficientes mensajes basura con otros de diferente tipo, comprobará que solo los primeros presentan determinadas características combinadas de cierta manera: por ejemplo, un mensaje que procede de Nigeria y que promete un premio de un millón de dólares huele a chamusquina. De hecho, puede haber rasgos de nivel superior muy sutiles que permitan identificar los mensajes no deseados: errores de ortografía y direcciones IP que no resultan en absoluto obvios, por ejemplo. Si uno lograra detectarlos, podría filtrar con acierto el correo basura, sin temor a eliminar el aviso de que su pedido de Viagra ya está en camino.

El aprendizaje automático ascendente permite rebuscar entre las pistas más relevantes para solventar una tarea de esta clase. Pero, para ello, una red neuronal debe seguir su propio proceso de aprendizaje. En primer lugar, tendrá que evaluar millones de ejemplos procedentes de enormes bases de datos, cada uno de ellos etiquetado como «correo basura» o «correo legítimo». A continuación, extraerá un conjunto de rasgos identificativos que distinguirán los mensajes no deseados de todos los demás. De un modo similar, la red podría inspeccionar imágenes de Internet etiquetadas como «gato», «casa», «es-

tegosaurio», etcétera. Una vez establecidas las características comunes a cada colección de datos (las pautas que distinguen, por ejemplo, a los gatos de los perros) conseguirá identificar fotografías de gatos que no haya visto antes.

Otro método ascendente, el aprendizaje no supervisado, se halla aún en una etapa relativamente temprana, pero permite detectar pautas en conjuntos de datos sin etiqueta alguna. Se limita a buscar combinaciones de rasgos que definan un objeto: en un rostro, por ejemplo, la nariz y los ojos aparecen siempre juntos y se diferencian de los árboles y las montañas del fondo. En estos sistemas avanzados de aprendizaje profundo, la identificación de un objeto se lleva a cabo mediante una división de trabajo en la que las tareas de reconocimiento se reparten entre las distintas capas de la red.

Un artículo publicado en *Nature* en 2015 puso de manifiesto cuánto han avanzado las técnicas ascendentes. Un equipo de investigadores de DeepMind, empresa propiedad de Google, combinó dos métodos, el aprendizaje profundo y el aprendizaje por refuerzo, de tal manera que posibilitó que una máquina llegara a dominar varios videojuegos de la consola Atari 2600 [véase «Talento sin consciencia», por Christof Koch; MENTE Y CEREBRO n.º 74, 2017]. El ordenador iniciaba las partidas sin saber nada sobre los juegos. Al principio, intentaba adivinar al azar los mejores movimientos, al tiempo que recibía información sobre su desempeño. El aprendizaje profundo ayudaba al sistema a identificar las características de la pantalla, mientras que el aprendizaje por refuerzo lo recompensaba cada vez que obtenía una puntuación alta. El ordenador alcanzó un elevado nivel de destreza en varios juegos y, en algunos casos, superó a jugadores humanos expertos. Dicho esto, también fracasó estrepitosamente en juegos que una persona consigue dominar sin ningún esfuerzo.

La facultad de la IA para aprender a partir de grandes colecciones de datos (millones de fotos de Instagram, mensajes de correo electrónico o grabaciones de voz) brinda soluciones a problemas que en el pasado parecían abrumadores, como el reconocimiento de imágenes y del habla. Aun así, merece la pena recordar que mi nieto no tiene dificultades de ningún tipo para reconocer un animal o para responder a una pregunta oral, a pesar de poseer una información y un acceso a los datos mucho más limitados. Numerosos problemas que resultan fáciles para un niño de cinco años de edad continúan siendo sumamente desconcertantes para un ordenador y mucho más complejos que aprender a jugar al ajedrez.

Las máquinas que consiguen reconocer caras peludas con bigotes necesitan a menudo millones de ejemplos para aprender a clasificar objetos que nosotros solo necesitamos ver unas pocas veces. Tras un entrenamiento extensivo, el sistema tal vez sea capaz de identificar un gato en una foto nunca antes vista, pero lo logra de un modo muy alejado de las generalizaciones humanas. Y, puesto que el programa razona de manera distinta, se producirán fallos: algunas imágenes de gatos no se etiquetarán como tales, mientras que otras sí se clasificarán de ese modo aunque consten de un borrón aleatorio que nunca engañaría a un humano.

EL CAMINO HACIA ABAJO

La otra manera de enfocar el aprendizaje automático que ha transformado la IA en los últimos años actúa en sentido opuesto; es decir, de arriba abajo. Aquí se parte de la hipótesis de que es posible adquirir conocimientos abstractos a partir de datos concretos porque ya disponemos de un importante bagaje cognitivo

y, en especial, porque el cerebro ya cuenta con una capacidad para entender abstracciones básicas. Al igual que un científico, podemos servirnos de tales conceptos para formular hipótesis sobre el mundo y pronosticar cómo deberían ser los datos (sucesos) si fueran correctas. Es decir, lo contrario de intentar extraer pautas a partir de los datos en bruto, como ocurre con los enfoques ascendentes.

La idea puede ilustrarse mejor volviendo a los mensajes basura y considerando un caso real en el que me vi involucrada. En cierta ocasión recibí un correo electrónico del editor de una revista de nombre extraño. Hacía referencia explícita a una de mis publicaciones y me proponía que escribiera un artículo. El mensaje no contenía ninguno de los indicios típicos: ni Nigeria, ni Viagra ni millones de dólares. Sin embargo, gracias a mis conocimientos previos, y a la facultad de pensar de manera abstracta en el proceso que origina la proliferación de estos mensajes, aquel se me antojó sospechoso.

Para empezar, sabía que quienes ponen en circulación mensajes basura intentan obtener dinero apelando a la codicia humana. Y en la comunidad académica hay tanto afán por publicar como el que pueda tener una persona normal por ganar un millón de dólares o por mejorar su rendimiento sexual. También sabía que, para cubrir costes, las revistas de acceso abierto legítimas cobran a los autores en lugar de a los suscriptores. Además, mi trabajo no guardaba relación con el título de la revista. Al unirlo todo, formulé la hipótesis, bastante verosímil, de que el mensaje buscaba académicos que pagasen para «publicar» un artículo en un medio falso. Me bastó un solo ejemplo para llegar a esta conclusión. Además, podía contrastar mi hipótesis investigando la buena fe del editor con una simple consulta en un motor de búsqueda.

Un experto en ciencias de la computación diría que semejante proceso de razonamiento corresponde a un «modelo generativo», capaz de representar conceptos abstractos como la codicia y el engaño. Este mismo modelo puede también describir el proceso seguido para elaborar una hipótesis; en este caso, el razonamiento que me llevó a concluir que el mensaje quizá fuera una estafa. No solo puedo explicar cómo funciona esta forma de correo basura, sino también imaginar otras clases de correspondencia indeseada, aunque no se asemejen a nada de lo que haya visto u oído antes. Y, al recibir el mensaje, puedo trabajar hacia atrás, analizando paso a paso por qué debe de tratarse de correo basura.

Los modelos generativos fueron esenciales durante la primera ola de la inteligencia artificial y las ciencias cognitivas, en los años cincuenta y sesenta, pero también adolecían de limitaciones. En primer lugar, la mayoría de los datos de un cierto tipo pueden explicarse, al menos en principio, mediante un elevado número de hipótesis. En mi caso, cabía la posibilidad de que el correo electrónico fuera legítimo, por más que pareciese improbable. Por tanto, los modelos generativos han de incorporar ideas sobre probabilidad: un aspecto que ha constituido una de las principales mejoras recientes de este tipo de métodos. En segundo lugar, a menudo no queda claro de dónde proceden los conceptos básicos que componen los modelos generativos. Pensadores como Descartes y Noam Chomsky han defendido que nacemos con ellos ya firmemente arraigados, pero ¿realmente venimos a este mundo sabiendo que la codicia y el engaño conducen a estafas?

Los modelos bayesianos, un excelente ejemplo moderno de enfoque descendente, intentan incorporar ambos aspectos. Así llamados en honor al estadístico y filósofo del siglo XVIII Thomas

Bayes, combinan los modelos generativos con la teoría de la probabilidad por medio de una técnica conocida como inferencia bayesiana. Un modelo probabilístico generativo puede indicarnos la probabilidad de que se observe un patrón específico de datos en caso de que se cumpla una determinada hipótesis. Si un correo electrónico es una estafa, casi con seguridad buscará aprovecharse de la codicia del lector; aunque, por supuesto, no todo mensaje que apele a la codicia humana será necesariamente correo basura. Al combinar los datos observados con el conocimiento preexistente sobre las hipótesis potenciales, un modelo bayesiano permite calcular, con bastante exactitud, la probabilidad de que un correo electrónico sea legítimo o fraudulento.

Este método se adecuaba mejor que su homólogo ascendente a lo que sabemos sobre cómo aprenden los niños. Esa es la razón por la que, durante los últimos quince años, nuestro grupo de investigación ha estado empleando modelos bayesianos para estudiar el desarrollo infantil. Nuestro laboratorio y otros han usado estas técnicas para entender el modo en que los niños descubren y establecen relaciones de causa y efecto, a fin de predecir de qué manera y en qué momento forjarán nuevas creencias sobre el mundo y cuándo cambiarán las que ya poseen.

Los métodos bayesianos constituyen una excelente manera de enseñar a las máquinas a aprender como los seres humanos. En 2015, Joshua B. Tenenbaum, del Instituto de Tecnología de Massachusetts y con quien trabajo en algunas ocasiones, Brenden M. Lake, de la Universidad de Nueva York, y sus colaboradores presentaron en *Science* el diseño de un sistema de IA capaz de reconocer caracteres desconocidos escritos a mano, una operación sencilla para una persona pero muy exigente para un ordenador.

Piense en sus propias facultades de reconocimiento. Aunque nunca haya visto el alfabeto japonés, seguramente podrá distinguir unos caracteres de otros. También conseguirá dibujarlos e incluso inventarse uno. Además, entenderá que existen diferencias entre las letras japonesas y las coreanas o las rusas. Eso fue justamente lo que el equipo de Tenenbaum logró que hiciera su algoritmo.

Con un método que operase de abajo arriba, primero tendríamos que introducir miles de ejemplos en el ordenador, que entonces usaría las pautas observadas en ellos para identificar nuevos caracteres. En cambio, el programa bayesiano proporciona a la máquina un modelo general de cómo dibujar un carácter, indicando, por ejemplo, que cierto trazo va hacia la derecha o hacia la izquierda. Una vez que el algoritmo termina un símbolo, continúa con el siguiente.

Cuando el programa veía un determinado carácter, podía inferir la secuencia de operaciones necesaria para dibujarlo y procedía a generar un conjunto similar de trazos por sí solo. Lo hacía del mismo modo en que yo deduje los pasos que condujeron al dudoso mensaje de la revista. Pero, en lugar de sopesar las probabilidades de que un correo electrónico fuera fraudulento, el modelo de Tenenbaum infería si era probable que una determinada secuencia de trazos produjera el carácter deseado. Este programa funcionó mucho mejor que el aprendizaje profundo aplicado a los mismos datos, acercándose casi al comportamiento humano.


EL MATRIMONIO PERFECTO

Los dos principales enfoques del aprendizaje automático se complementan uno a otro. Con un método ascendente, el ordenador no tiene por qué saber desde el principio nada sobre gatos, aunque necesitará disponer de un gran volumen de datos.

Por su parte, un sistema bayesiano puede aprender a partir de pocos ejemplos y logra generalizar de un modo más amplio, si bien se requiere mucho trabajo inicial para formular el conjunto correcto de hipótesis. Además, ambas técnicas pueden toparse con obstáculos similares. Por ejemplo, las dos estrategias se centran únicamente en problemas relativamente cerrados y bien definidos, como reconocer caracteres escritos, gatos o jugar a videojuegos de Atari.

Los niños no actúan con las mismas restricciones. Los psicólogos del desarrollo han descubierto que, de alguna manera, los pequeños combinan las mejores cualidades de cada estrategia y las multiplican. A Augie le bastan uno o dos ejemplos para aprender, como ocurre con los métodos que operan de arriba abajo. Pero también extrae conceptos nuevos a partir de los datos, como en los sistemas ascendentes; conceptos que en un principio no se encontraban allí.

Augie puede hacer muchas cosas más. Reconoce un gato al instante y distingue las letras, pero también realiza nuevas y sorprendentes inferencias que van mucho más allá de su experiencia o conocimientos previos. Hace poco me explicó que, si un adulto quiere volver a ser un niño, no debería comer verdura, ya que esta hace que los niños crezcan y se hagan adultos. No tenemos prácticamente ninguna idea de cómo surge esta clase de razonamiento creativo.

Cuando oímos declaraciones acerca de que la IA entraña una amenaza existencial, deberíamos recordar que la mente humana y sus capacidades siguen siendo un misterio. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático pueden parecer aterradores. Y en algunos aspectos lo son. El Ejército está investigando cómo aplicar estos sistemas al control de armas. La estupidez natural puede causar más estragos que la inteligencia artificial, y los humanos tendremos que aprender a regular las nuevas tecnologías con mayor tino que en el pasado. La ley de Moore representa una fuerza influyente: aunque los avances en computación se deban más a un incremento cuantitativo en la potencia de cálculo y de procesamiento de datos que a revoluciones conceptuales en nuestra comprensión de la mente, aún pueden tener consecuencias prácticas de gran trascendencia. Dicho esto, no deberíamos pensar que estamos a punto de liberar a un gólem tecnológico. 

PARA SABER MÁS

Bayesian networks, Bayesian learning and cognitive development. Alison Gopnik et al. en *Developmental Science*, vol. 10, n.º 3, págs. 281-287, mayo de 2007.

Human-level concept learning through probabilistic program induction. Brenden M. Lake et al. en *Science*, vol. 350, págs. 1332-1338, diciembre de 2015.

The gardener and the carpenter: What the new science of child development tells us about the relationship between parents and children. Alison Gopnik. Farrar, Straus & Giroux, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Así piensan los bebés. Alison Gopnik en *IyC*, septiembre de 2010.

Técnicas de aprendizaje automatizado. Yaser S. Abu-Mostafa en *IyC*, abril de 2013.

Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.

El valor de la experiencia para los robots. Ramon López de Mántaras en *IyC*, agosto de 2016.

GENÉTICA

EL EPITRANSCRIPTOMA, UN NUEVO GIRO DE LA EPIGENÉTICA

El redescubrimiento de marcas químicas en el ARN
está conmocionando el estudio de la expresión de los genes.

Las técnicas que las analizan han sido
declaradas método del año 2016

Cassandra Willyard



ALGUNAS GRANDES IDEAS PARECEN SURGIR DE LA NADA, PERO, EN 2008, Chuan He andaba buscando una deliberadamente. Los Institutos Nacionales de la Salud de Estados Unidos acababan de publicar una convocatoria para financiar proyectos de alto riesgo y de gran impacto, y He, químico de la Universidad de Chicago en Illinois, quería solicitar uno. Pero necesitaba una buena idea.

Había estado estudiando una familia de proteínas que reparan el ADN dañado y empezó a sospechar que estas enzimas también podrían actuar sobre el ARN. Gracias a un golpe de suerte conoció al biólogo molecular Tao Pan, quien había estado investigando ciertos marcadores químicos, denominados grupos metilo, que presentan las moléculas de ARN. Los dos trabajaban en el mismo edificio de la Universidad de Chicago y comenzaron a reunirse con regularidad. A raíz de esas conversaciones comenzó a perfilarse su gran idea.

Por aquel entonces, los biólogos mostraban un gran entusiasmo sobre el epigenoma, la amplia gama de marcas químicas que decoran el ADN y las proteínas sobre las que esta molécula se sustenta. Tales marcas actúan como anotaciones que indican a la célula qué genes deben expresarse y cuáles deben permane-

cer en silencio. De este modo, el epigenoma ayuda a explicar el modo en que las células con un mismo ADN dan lugar a la multitud de tipos celulares especializados que forman parte de los distintos tejidos. Las marcas permiten, por ejemplo, que las células cardíacas mantengan su identidad y no se conviertan en neuronas o adipocitos. En las células cancerosas es frecuente encontrar marcadores epigenéticos mal ubicados.

Cuando He y Pan comenzaron a trabajar juntos, la mayoría de las investigaciones epigenéticas se centraban en las marcas que se asociaban al ADN o a las proteínas histonas sobre las que este se enrolla. Pero también se habían identificado más de 100 tipos de marcas en el ARN y se desconocía la función que desempeñaban. Algunas de las enzimas que He estaba estudiando tenían la capacidad de eliminar grupos metilo, por lo que él y Pan se

preguntaron si alguna de ellas actuaría también sobre el ARN. Si lograran borrar las marcas estaríamos ante un método totalmente nuevo para controlar la expresión de los genes. En 2009 consiguieron financiación para tratar de identificar las marcas químicas reversibles del ARN y las proteínas que las eliminan.

Nueve años después, esta investigación ha dado lugar a una nueva ciencia «-ómica», la que estudia el epitranscriptoma. He y otros investigadores han demostrado que un grupo metilo unido a la adenina, una de las cuatro bases del ARN, desempeña un papel fundamental en la diferenciación celular y puede contribuir al cáncer, la obesidad y otras enfermedades. En 2015, el laboratorio de He y otros dos grupos descubrieron la misma marca química en las bases de adenina del ADN (hasta entonces, las marcas de grupos metilo solo se habían hallado unidos a la citosina), lo que hace pensar que el epigenoma podría ser todavía más complejo de lo que se había imaginado. La investigación ha despegado. «Creo que nos estamos acercando a una edad de oro de la epigenómica y la epitranscriptómica», afirma Christopher Mason, genético del Colegio Médico Weill Cornell, en la ciudad de Nueva York. «De hecho, estamos empezando a ver todas estas modificaciones que, desde hace décadas, sabíamos que estaban ahí.» Debido al auge de la epitranscriptómica, las técnicas que analizan este nuevo nivel de información fueron designadas método del año 2016 por la revista *Nature Methods*.

MARCAR AL MENSAJERO

El dogma central de la biología molecular sostiene que la información fluye del ADN al ARN mensajero (ARNm) y, después, a la proteína. Por consiguiente, muchos científicos consideraban el ARNm como un simple intermediario que transmitía la información genética desde el núcleo celular hasta las fábricas de proteínas del citoplasma, los ribosomas. Esa es una de las razones por las que pocos científicos se fijaron en las modificaciones sufridas por el ARNm.

Sin embargo, esas marcas químicas no constituían ningún enigma. La que empujó a He a la primera línea de la epitranscriptómica fue descubierta en el ARNm en 1974. Fritz Rottman, químico orgánico de la Universidad Estatal de Michigan en East Lansing, intentaba comprender el papel del ARN en la regulación de la expresión génica cuando se topó con un grupo metilo en la adenina del ARNm. El nucleósido modificado se denomina N^6 -metiladenosina, término que suele abreviarse como m^6A . (El nucleósido corresponde a la unión del azúcar ribosa y la base nitrogenada adenina.)

Rottman y sus colaboradores plantearon que la metilación del ARN podría ser una manera de seleccionar determinados transcritos para su traducción a proteínas. «Pero todo ello era especulación», afirma Karen Friderici, genética de la Universidad Estatal de Michigan y coautora del artículo de 1974. El equipo no tenía los medios para investigar la verdadera función de la marca. «Era el principio de la biología molecular. Carecíamos de muchas de las herramientas hoy disponibles», comenta.

Cassandra Willyard, periodista científica, escribe sobre ecología, enfermedades infecciosas y epigenética, entre otros temas.



Tuvieron que transcurrir más de tres décadas para que He y Pan descubrieran tales herramientas. «Es realmente difícil estudiar estas modificaciones», afirma Pan. Se necesita un espectrómetro de masas potente y técnicas de secuenciación a gran escala.

A pesar de ello, Ye Fu y Guifang Jia, dos científicos que por aquel entonces trabajaban en el laboratorio de He, lo siguieron intentando, centrando su atención en la proteína FTO. Esta pertenece a la familia de enzimas encargadas de eliminar del ADN los grupos metilo que estaba estudiando el grupo de He. Fu y Jia pensaron que FTO podría suprimir los grupos metilo del ARN, pero tuvieron grandes dificultades para identificar la molécula sobre la que actuaba. De modo que comenzaron a sintetizar fragmentos de ARN que contuvieran distintas modificaciones para determinar cuáles de ellas eran eliminadas por la FTO. Avanzaban con lentitud. En el transcurso de tres años, el equipo tuvo que hacer frente a una serie de fracasos en cadena. «Casi llegué a pensar que nunca descubriría su función», comenta Fu.

Por fin, en 2010, el equipo decidió comprobar la actividad de FTO sobre m^6A , la adenina metilada. El marcador desapareció. El equipo había demostrado por primera vez que la metilación del ARN era reversible, igual que las marcas presentes en el ADN y en las histonas. Para He, parecía confirmarse la existencia de un sistema de regulación de los genes basado en el ARN.

PRUEBAS CRECIENTES

El grupo de He no era el único interesado por la modificación m^6A . En 2012, dos equipos publicaron, de forma independiente, los primeros mapas donde aparecía la marca. Los estudios describieron más de 12.000 lugares metilados en moléculas de ARNm correspondientes a unos 7000 genes. «Tras años de oscuridad, se nos abrió de repente un panorama inmenso», escribió Dan Dominissini, autor de uno de los estudios, en un ensayo publicado en la revista *Science*.

Los mapas mostraban que la distribución de m^6A no era aleatoria. Su ubicación sugería que podría intervenir en el corte y empalme (*splicing*), o maduración, de los transcritos de ARN, un mecanismo que permite a las células fabricar múltiples versiones de una proteína a partir de un único gen.

En los últimos años, se ha identificado parte de la maquinaria implicada en la regulación de estas marcas. Cada una de ellas necesita una proteína que «escriba», es decir, que la añada a la hebra; otra que «borre», que la suprima de la hebra; y otra que «lea» para interpretarla. A medida que se ha ido desvelando la identidad de estas proteínas, se ha llegado a la conclusión de

EN SÍNTESIS

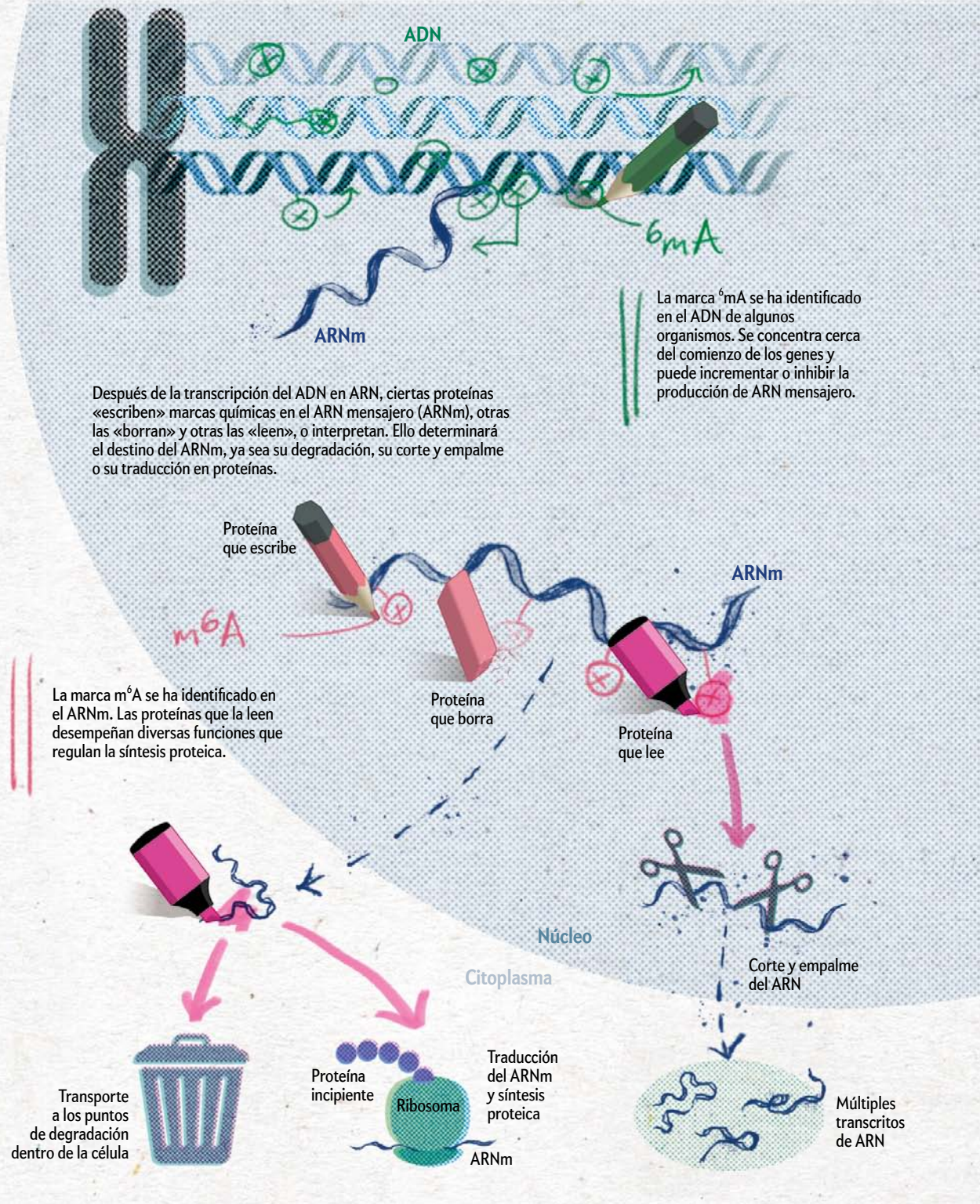
Se sabe desde hace tiempo que las modificaciones o marcas químicas del ADN, lo que constituye el epigenoma, regulan la expresión de los genes, esto es, cuáles deben dar lugar a proteínas y cuáles no.

También se habían observado una variedad de modificaciones en el ARN, las cuales se producían después de la transcripción del ADN en ARN. Sin embargo, se desconocía su función.

En tiempo reciente se ha desentrañado la ubicación de estas marcas y el modo en que se añaden, eliminan e interpretan. Se ha comprobado que ejercen también un importante papel regulador de la expresión de los genes y constituyen un nuevo nivel de información genética, el epitranscriptoma.

Lectura, escritura y regulación

Gran parte de la investigación sobre las modificaciones epigenéticas se ha concentrado en las marcas metilo de las citosinas del ADN. Recientes estudios han puesto el foco de atención en las adeninas metiladas tanto en el ADN como en el ARN. La identificación de proteínas que añaden, interpretan o eliminan estas marcas indica su importancia en la regulación de la expresión de los genes. El conjunto de las modificaciones del ARN supone un nuevo nivel de información genética denominado epitranscriptoma.



que m⁶A no solo participa en el corte y empalme del ARN, sino también en su traducción y su estabilidad.

De este modo, una proteína que lee las marcas m⁶A hace que el ARNm se destruya con más rapidez al ser transportado a ciertos lugares de degradación dentro de la célula, mientras que otra promueve la síntesis proteica al guiar el ARN metilado hasta el ribosoma.

La ubicación de la marca m⁶A en el ARN y la naturaleza de la proteína «lectora» que se una a ella indicará a una célula si debe sintetizar una proteína o destruir un transcrito. Pero llegar a comprender cómo funciona esta selección ha supuesto un importante desafío, afirma Gideon Rechavi, genetista de la Universidad de Tel Aviv que participó en el cartografiado de m⁶A.

Lo que sí está claro es que m⁶A desempeña funciones cruciales en la diferenciación celular. Las células que carecen de esa marca se quedan atascadas en un estado parecido al de las células madre o progenitoras. Ello puede resultar letal: cuando He y sus colaboradores desactivaron la proteína que «escribe» las marcas m⁶A en ratones, muchos de los embriones murieron en el útero.

He propone una posible función de m⁶A. Cada vez que una célula pasa de un estado a otro (como sucede durante la diferenciación), sus moléculas de ARNm tienen que cambiar también. Este proceso, al que él denomina «cambio de transcriptoma», requiere precisión y una cuidadosa elección del momento oportuno para realizarlo. He cree que las marcas de metilo podrían ser un mecanismo utilizado por las células para sincronizar la actividad de miles de transcritos.

Wendy Gilbert, bióloga del Instituto de Tecnología de Massachusetts en Cambridge, sostiene que la explicación de He es plausible. «Una de las facetas que me gustan de las presentaciones de He de los últimos dos años es su esfuerzo por intentar expresar con palabras el aspecto más importante de la marca», afirma. Pero puntualiza que hay otras formas de coordinar la expresión de grandes grupos de genes, como los microARN, pequeños fragmentos de ARN que no codifican proteínas y que ayudan

a silenciar los genes. «No sé si las marcas m⁶A representan la única manera para conseguirlo», comenta.

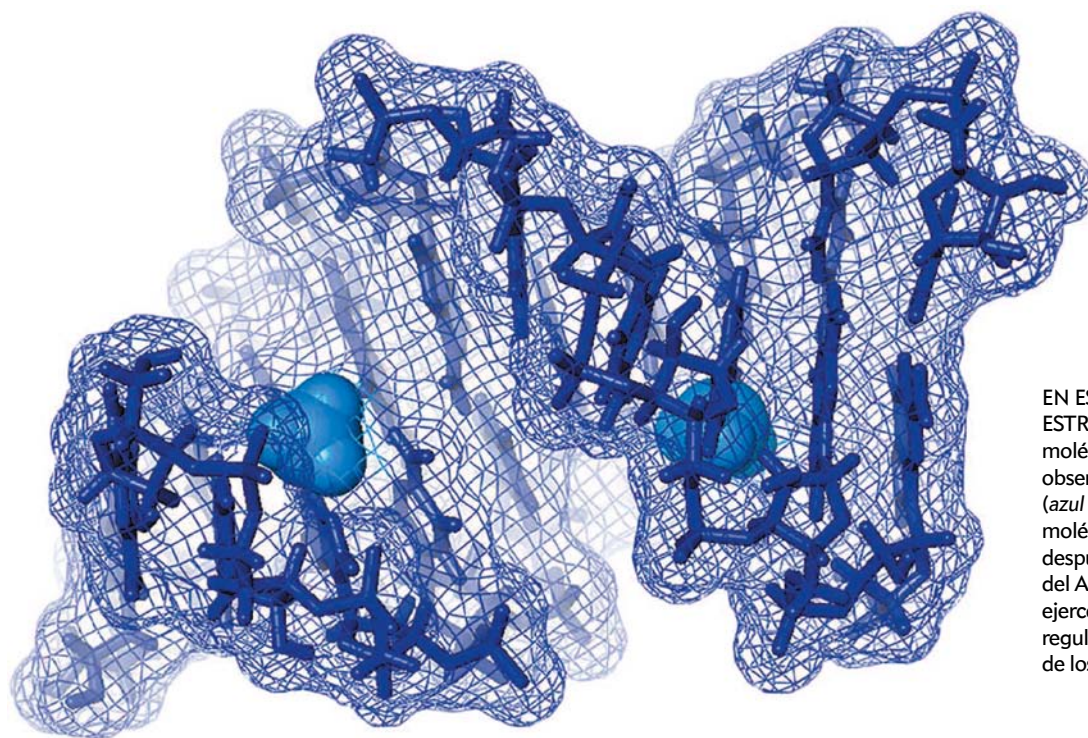
MARCAS EN EL ADN

Aunque se sabía hace tiempo que el ARN muestra modificaciones que decoran sus cuatro bases, el ADN de los mamíferos parecía tener tan solo unas pocas marcas, todas sobre la citosina. La modificación más habitual en ellos, la 5-metilcitosina (⁵mC), es tan importante que con frecuencia se refiere a ella como la «quinta base», después de la adenina, la citosina, la timina y la guanina. Pero He se preguntaba si también podría haber otras marcas ocultas en el genoma. Las bacterias presentan el equivalente de la m⁶A en el ADN, denominado N⁶-metiladenina (⁶mA). «Utilizan la metilación para distinguir su propio ADN del foráneo», comenta Eric Greer, bioquímico del Hospital Pediátrico de Boston, en Massachusetts. Pero los científicos tuvieron que esforzarse para confirmar su presencia en organismos más complejos.

En 2013 Fu, investigador posdoctoral de He, había dado con un interesante artículo publicado en los años setenta que demostraba que el ADN de algas contiene adenina metilada. «Nunca supo nadie su función ni nadie lo investigó», afirma Fu.

Fu y otro investigador posdoctoral, Guan-Zheng Luo, decidieron averiguarlo y cartografiaron la distribución de ⁶mA en el ADN del alga *Chlamydomonas*. La hallaron en más de 14.000 genes y su distribución no era aleatoria, sino que se concentraba en torno a los lugares donde comenzaba la transcripción. «Observamos un patrón periódico en su localización», comenta Fu. Concluyeron que la marca podría estar promoviendo la activación de los genes.

A casi 2000 kilómetros de distancia, en Boston, Greer y sus colaboradores habían descubierto la marca ⁶mA en el genoma de un gusano, *Caenorhabditis elegans*. Greer, por entonces investigador posdoctoral, estaba estudiando la herencia epigenética en un mutante de *C. elegans* que se vuelve menos fértil tras cada generación. Quería averiguar cómo se transmitía esa infertilidad de una generación a la siguiente. Durante



EN ESTE MODELO ESTRUCTURAL de la molécula de ARN se observan grupos metilo (azul claro) unidos a la molécula. Incorporados después de la transcripción del ADN, estos grupos ejercen una función reguladora en la expresión de los genes.

mucho tiempo se había pensado que *C. elegans* carecía de grupos metilo marcadores, pero Greer decidió comprobarlo mediante anticuerpos que se unieran de forma específica a las bases metiladas. Ni él ni sus colaboradores identificaron ningún grupo ⁵mC, pero sí ⁶mA. Y no solo eso: los valores de este último parecían ser más elevados en las generaciones menos fértiles, «lo que hacía sospechar que se trataba de un portador de esa información no genética», afirma. El resultado sorprendió. Los investigadores ya habían estado buscando antes la marca ⁶mA en organismos multicelulares, pero no la habían detectado porque se presentaba en concentraciones muy reducidas.

El director del laboratorio de Greer, Yang Shi, sabía que He había descubierto ⁶mA en algas y le pidió ayuda. He se entusiasó al enterarse de lo que había descubierto el grupo de Shi. «Decidimos ponernos a trabajar juntos», comenta He. Un par de meses después, He se reunió en China con un investigador que había descubierto ⁶mA en la mosca de la fruta *Drosophila*. «Casi me caigo al suelo», afirma He. En abril de 2015, los tres artículos se publicaron simultáneamente en la revista *Cell*.

Andrew Xiao, experto en epigenética de la Universidad Yale en New Haven, Connecticut, leyó los artículos con interés. Él y sus colaboradores habían identificado marcas ⁶mA en células de mamífero, pero no habían publicado sus resultados. «No creíamos que nadie se interesara por este campo», comenta Xiao. Pero los artículos de *Cell* demostraron que estaba equivocado. «Nos dimos cuenta de que debíamos darnos prisa.»

Al cabo de un año, el grupo de Xiao y otros revelaron que podían medir niveles extraordinariamente bajos de ⁶mA en células madre embrionarias de ratón. Cuando examinaron la distribución de la marca, descubrieron los valores máximos sobre el cromosoma X, donde parecía intervenir en el silenciamiento de la expresión génica. Los investigadores también identificaron una enzima que parece borrar las marcas ⁶mA.

Xiao todavía está desentrañando la función de ⁶mA. Sostiene que parece ejercer un papel esencial en determinadas etapas del desarrollo al actuar como un interruptor molecular: en cierto momento apenas existe, después su concentración se dispara y, finalmente, desaparece.

«Su artículo causó sensación», comenta Samie Jaffrey, investigador del Colegio Médico Weill Corner. «Verdaderamente reveló las funciones de ⁶mA.» Tanto He como Shi afirman que también han identificado ⁶mA en células de mamífero.

Sin embargo, la importancia de ⁶mA sigue sin estar clara, afirma Shi. Señala que, incluso con las técnicas más avanzadas, la marca se halla en el límite de lo que puede detectarse y su localización precisa no puede cartografiarse. Y lo más probable es que su patrón de distribución varíe de un tejido a otro.

Aún quedan importantes cuestiones por resolver. Mamta Tahiliani, genetista de la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York, afirma que el trabajo sobre ⁶mA es «increíblemente interesante», pero señala que todavía no se ha demostrado que la marca pase de una generación de células a su descendencia, una de las características distintivas de las modificaciones epigenéticas.

EN BUSCA DE OTRAS MARCAS

Mientras algunos expertos profundizan en sus estudios para tratar de comprender la función de m⁶A y de ⁶mA, otros están buscando nuevas modificaciones. El año pasado, He, Rechavi y sus colaboradores publicaron el descubrimiento de otro grupo metilo en la adenina del ARN denominado N¹-metiladenosina

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Epigenética*, nuestro monográfico de la colección TEMAS que recoge los artículos más relevantes de *Investigación y Ciencia* sobre esta nueva disciplina, que estudia los mecanismos que modifican la expresión de los genes sin que varíe la secuencia del ADN.



www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/81

(m¹A). Este marcador también parece promover la traducción, aunque el mecanismo subyacente es distinto del de ⁶mA. He afirma que también podría intervenir en la sincronización de los transcritos durante el cambio de transcriptoma.

Más tarde, el pasado enero, Jaffrey y sus colaboradores publicaron otro tipo de modificación que tiene lugar cerca de los extremos de los ARNm. Descubrieron que los ARNm con esta marca, denominada m⁶Am, son más estables porque sus extremos son más difíciles de eliminar. «La variedad de modificaciones del ARNm que pueden influir sobre la expresión génica resulta mucho más compleja de lo que nadie se podía imaginar», afirma Gilbert.

Junto a estos nuevos descubrimientos también se han producido disputas científicas. El trabajo de Jaffrey indica que la proteína FTO, que He identificó como «borradora» de las marcas m⁶A, en realidad actúa sobre m⁶Am. Y en octubre del año pasado, el grupo de He publicó que la enzima que Xiao había descrito que suprimía las marcas ⁶mA del ADN en verdad elimina mejor las de m¹A en cierto tipo de ARN. Tales ambigüedades son esperables en un área que está experimentando un auge tan rápido.

«Nos hallamos al principio del camino», afirma Rechavi. Y, a medida que las técnicas mejoren, las marcas podrán observarse cada vez con mayor claridad. La abundancia de posibilidades científicas hace que Mason se sienta eufórico. «Creo que es el momento más apasionante para estar trabajando en este campo.» ■

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 542, págs. 406-408, 2017.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de **nature**

PARA SABER MÁS

- Roadmap to the epitranscriptome.** D. Dominissini en *Science*, vol. 346, pág. 1192, diciembre de 2014.
- DNA methylation on N⁶-adenine in mammalian embryonic stem cells.** T. P. Wu et al. en *Nature*, vol. 532, págs. 329-333, abril de 2016.
- The dynamic N¹-methyladenosine methylome in eukaryotic messenger RNA.** D. Dominissini et al. en *Nature*, vol. 530, págs. 441-446, febrero de 2016.
- Method of the year 2016. Special Feature.** VV.AA. en *Nature Methods*, vol. 14, enero de 2017.
- Reversible methylation of m⁶A_m in the 5' cap controls mRNA stability.** J. Mauer et al. en *Nature*, vol. 541, págs. 371-375, enero de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

- El nacimiento de la epigenética.** W. Wayt Gibbs en *lyC*, abril de 2004.
- Un nuevo tipo de herencia.** Michael K. Skinner en *lyC*, octubre de 2014.
- El epitranscriptoma del cáncer.** Manel Esteller en *lyC*, septiembre de 2017.

MEDICINA

EL EPITRANSCRIPTOMA DEL CÁNCER

Más allá de los cambios en el genoma y el epigenoma, las modificaciones que se producen en los transcritos del ARN pueden favorecer la aparición de esta enfermedad

Manel Esteller



A COMPLEJIDAD DE LAS FUNCIONES DE LOS SERES VIVOS, EJEMPLIFICADA EN LAS especializaciones de cada uno de sus órganos, tejidos o células, se basa en sofisticados sistemas de información. El primer nivel de esa información se almacena en el genoma. Así, los rasgos que distinguen una especie de otra se deben a diferencias en él.

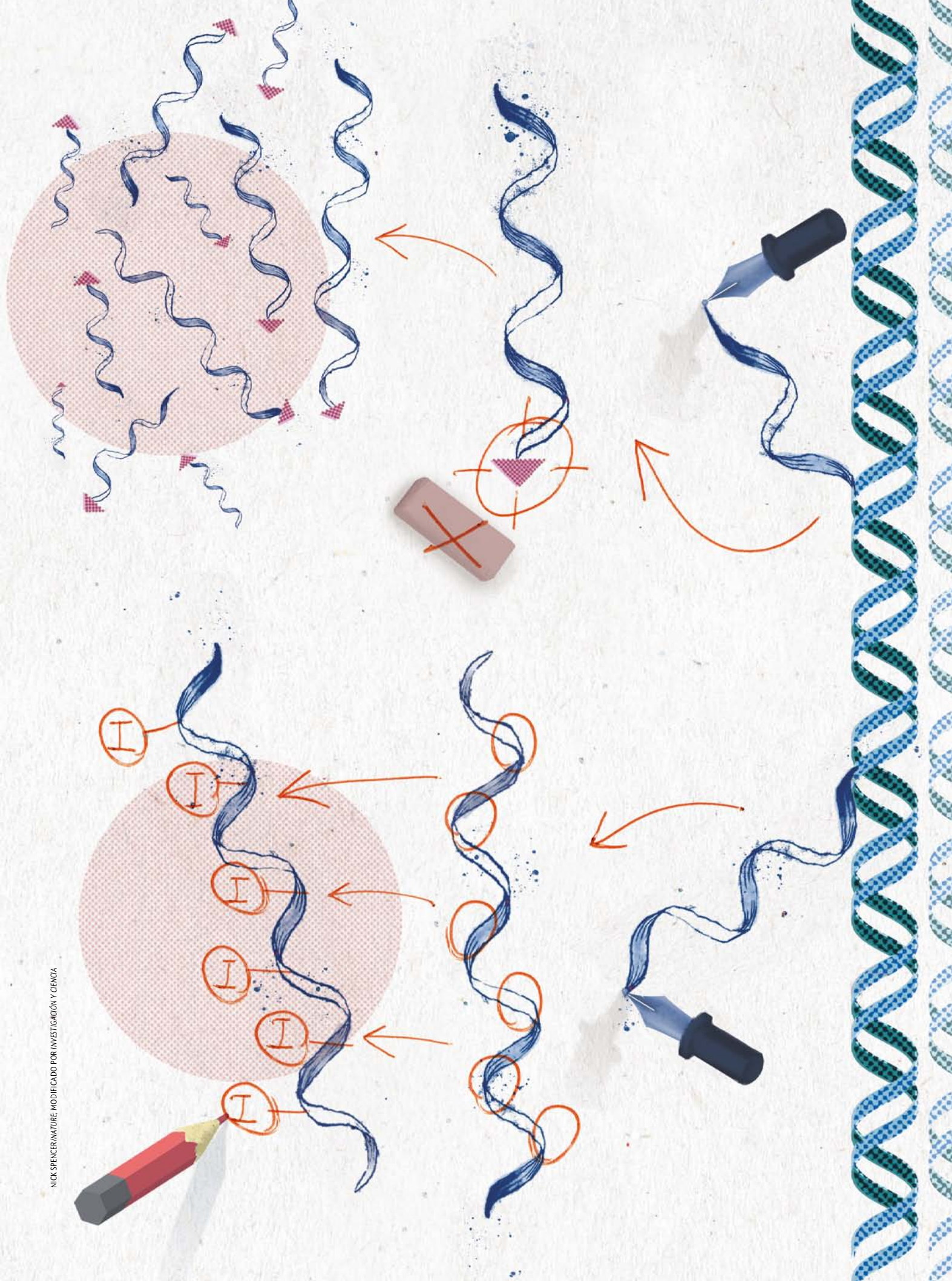
Sin embargo, algunas observaciones parecen contradecir esa idea fundamental. Una de ellas es que, a pesar de los importantes rasgos que nos distinguen, nuestros parientes primates no homínidos y nosotros compartimos casi la misma secuencia de ADN. El problema se engrandece cuando nos damos cuenta de que todas las células de un mismo individuo (excepto algunas del sistema inmunitario) tienen el mismo ADN. ¿Cómo es posible entonces que una célula de la retina exprese (o produzca) rodopsina para captar la luz y una de la sangre exprese hemoglobina para transportar oxígeno?

La respuesta la hallamos en el modo en que se regula ese ADN, es decir, la manera en que la información genética se transforma en proteínas. Existen modificaciones químicas que, al actuar sobre el ADN y sus proteínas reguladoras, controlan la actividad de los genes sin mutar la secuencia genética. Estas modificaciones, también llamadas marcas o señales, pueden heredarse de una célula a otra (a través de la mitosis) y de un

individuo a otro (a través de la meiosis). La ciencia que estudia estos cambios se denomina epigenética.

La señal química epigenética más estudiada es la metilación del ADN, en la que un grupo metilo se añade a la base nitrogenada citosina, con lo que se convierte en metilcitosina. Algunas enfermedades humanas se deben a mutaciones en el genoma. Pero otras están causadas por alteraciones en el epigenoma (el conjunto del genoma más las marcas epigenéticas). Por ejemplo, en el cáncer se ha observado que ciertos genes antitumorales, cuya misión consiste en frenar la división celular incontrolada, dejan de funcionar porque sufren una hipermetilación de sus regiones reguladoras. Este exceso de grupos metilo impide la expresión del ARN antitumoral, lo que provoca el desarrollo del cáncer.

Pero, desde hace poco, se está descubriendo la importancia de un nuevo mecanismo de regulación que supone una vuelta de tuerca más en el modo en que se interpreta la información genética. Se trata del epitranscriptoma, el conjunto de modifi-



caciones químicas que sufre no el ADN, sino el ARN. Debido a las múltiples posibilidades que tiene de cambiar la expresión de los genes, el epitranscriptoma representa una caja de Pandora casi inexplorada.

Nuestro grupo del Instituto de Investigación Biomédica de Bellvitge y otros estamos descubriendo que algunos tipos de cáncer se asocian a defectos en este nivel de información, las modificaciones del ARN, sea este mensajero (ARNm, que da lugar a las proteínas), sea este no codificante (el que no produce proteínas, sino que regula su síntesis, por ejemplo, al intervenir en la transcripción del ADN en ARNm).

MÚLTIPLES MARCAS EN EL ARN

La molécula de ARN era considerada con frecuencia un mero intermediario entre el gen y la proteína. Esta visión cambió cuando, además de los clásicos ARN mensajeros, se empezaron a caracterizar ARN no codificantes. Además de los ARN de transferencia y ribosómico, que también participan directamente en la síntesis proteica, existe una gran variedad de ARN que ejercen otras funciones, la mayoría relacionadas con la expresión de los genes. Los más estudiados son los microARN, que se unen al ADN para controlar su transcripción.

Recientemente se ha comenzado a reconocer que si la información del genoma está regulada por el epigenoma, también el transcriptoma (el conjunto de ARN de una célula) cuenta con su propio sistema de modulación: el epitranscriptoma, o las modificaciones químicas de los distintos tipos de ARN.

Mientras que las marcas que se añaden al ADN son pocas, entre ellas la metilación y una variante de esta, la hidroximetilación, se han descrito más de 100 modificaciones químicas para el ARN. Tan solo ahora se están empezando a caracterizar y a determinar cuántas de ellas están presentes en las células humanas.

Además de la metilación y la hidroximetilación de la citosina del ARN, se han identificado otras modificaciones: la metilación en dos lugares distintos de la base nitrogenada adenina, así como de los nucleótidos situados a ambos extremos de la molécula de ARN; la conversión de la uridina en otra especie exótica llamada pseudouridina; la edición del ARN, en la que se originan guaninas a partir de adeninas; la circularización de la molécula de ARN; o modificaciones aún más insólitas, como la O-metilación (adición de un grupo metilo a la ribosa del ARN), la carboxilcitosina (citosina con un grupo carboxilo), la formilcitosina (citosina con un grupo formilo) o la quenosina (una variante de la guanosina).

UN SINFÍN DE COMETIDOS

Las funciones de las modificaciones o marcas del ARN son múltiples, según se está averiguando en los últimos años. La metilcitosina, la metiladenina y la pseudouridina del ARN influyen en la eficacia de la traducción (también conocida como eficacia traslacional). Ello significa que se sintetiza más proteína no porque se produzca más ARN mensajero, sino porque el que se

Manel Esteller es director del Programa de Epigenética y Biología del Cáncer del Instituto de Investigación Biomédica de Bellvitge, investigador ICREA y profesor de genética de la Universidad de Barcelona.



origina se «traduce» mejor en proteínas cuando se encuentra en los ribosomas (las fábricas celulares de las proteínas).

Las marcas también regulan la estructura secundaria del ARN. Aunque a menudo nos imaginamos el ARN (y también el ADN) como simples líneas rectas, este no es el caso. Ambas moléculas adquieren una conformación tridimensional que les permite ejercer su función. Esta configuración resulta especialmente importante en el ARN no codificante: el patrón de marcas que presente le hará adoptar una forma particular que le permitirá interaccionar con una molécula concreta. Por lo tanto, su función podrá variar según la distribución de marcas que exhiba.

Otra función interesante de las marcas guarda relación con la estabilidad del ARN, teniendo en cuenta que se trata de una molécula frágil. Si bien es posible estudiar el ADN de seres de la antigüedad, del pobre ARN suele quedar muy poco rastro con el tiempo. Un perfil de marcas que proteja el ARN de agresiones comportará, por tanto, una mayor expresión de la proteína codificada por él.

Pero, además, el epitranscriptoma puede determinar si una molécula del ARN queda secuestrada en el núcleo celular, donde se origina, o puede escaparse de él para llevar a cabo su cometido en el citoplasma. Así, otra forma con la que las marcas del ARN determinan la actividad de un gen consiste en decidir su destino en la célula. Se están identificando muchas más funciones del epitranscriptoma, como la capacidad de cambiar el código genético clásico o controlar la producción de las numerosas isoformas de un ARN. Los descubrimientos futuros en esta área se intuyen apasionantes.

TÉCNICAS EN DESARROLLO

Una de las dificultades que plantea el campo de la epitranscriptómica es puramente metodológica. Aún no disponemos de todas las herramientas que quisiéramos para analizar con precisión y detalle todas las modificaciones químicas del ARN.

Igual que para estudiar las enfermedades infecciosas e identificar los microbios que las provocan se necesitaron buenos microscopios, lo mismo ha sucedido en el ámbito de la genética. Primero se analizaron los genes por separado y ahora secuenciamos genomas enteros. Idéntico proceso sufrió el epigenoma: primero se empezó examinando la metilación de un gen y ahora los analizamos todos.

En cuanto al ARN, existe una dificultad añadida: la labilidad de la molécula antes comentada. Pero, además, nos faltan buenos protocolos químicos y moleculares. Por ejemplo, la metilación

EN SÍNTESIS

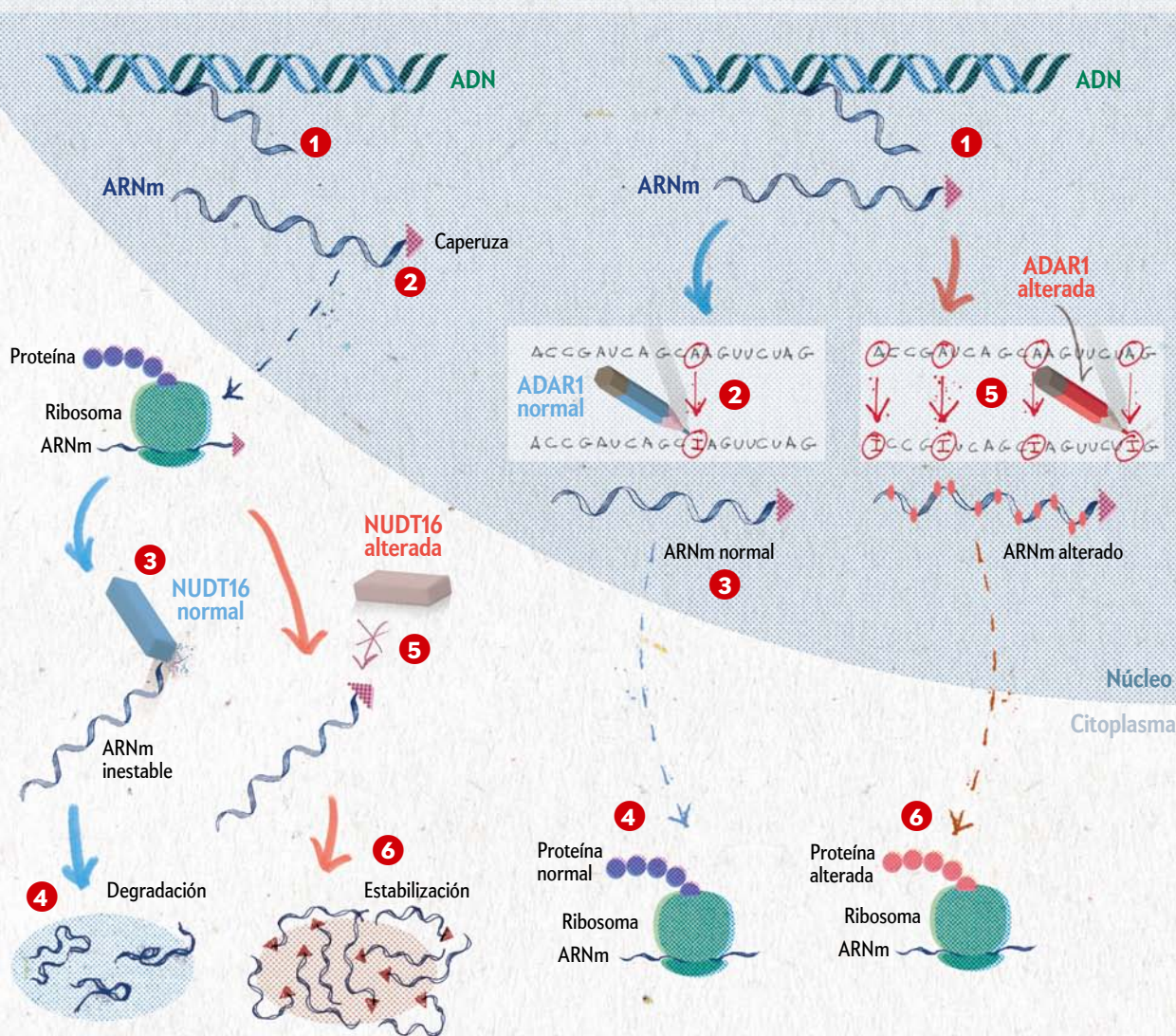
El cáncer puede estar provocado por mutaciones de ciertos genes, esto es, en la secuencia del ADN. También lo puede causar el mal funcionamiento de ciertas marcas químicas o modificaciones en el ADN, lo que se conoce como epigenoma.

Ahora se ha descubierto un nuevo mecanismo genético que puede desembocar en cáncer y que afecta al ARN. En concreto, se han observado anomalías en las modificaciones que presenta el ARN, que controlan también la expresión de los genes y constituyen el epitranscriptoma.

Algunas de esas alteraciones se han asociado a determinados tumores. Los fallos pueden producirse en las proteínas que añaden, eliminan o interpretan las marcas químicas.

Marcas alteradas en el cáncer

Las modificaciones o marcas químicas del ARN desempeñan funciones importantes en la actividad de esta molécula. En algunos tumores se ha observado que estas modificaciones se hallan alteradas. En particular, las proteínas que añaden, eliminan o interpretan estas marcas no funcionan bien, lo que lleva a la división celular anómala propia de la enfermedad. Abajo se ilustran dos ejemplos de ese mal funcionamiento en dos tipos de cáncer.

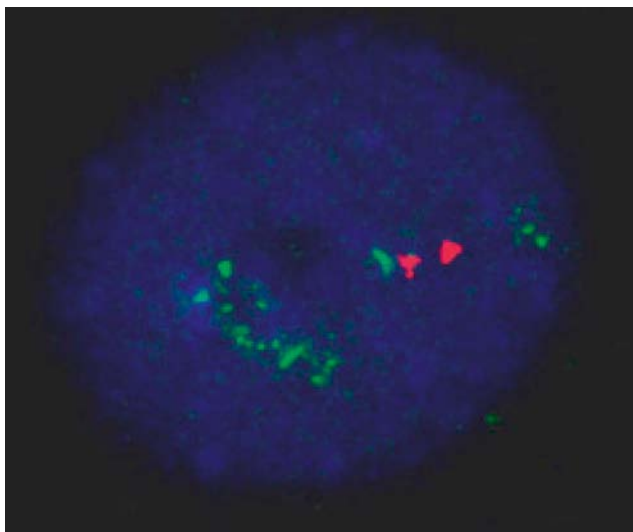


Leucemia

Después de la transcripción del ADN (1), al ARN mensajero (ARNm) resultante se le añade una caperuza, una modificación esencial que estabiliza la molécula y participa en la salida de esta del núcleo (2), lo que permite su traducción en proteína en el ribosoma. En condiciones normales, la enzima NUDT16 (3) elimina a continuación la caperuza del ARNm, con lo que este se desestabiliza, es degradado (4) y cesa la síntesis proteica. Pero en algunos tipos de leucemia se ha observado que NUDT16 no funciona bien y no retira la caperuza (5), lo que provoca que el ARNm se estabilice y se acumule en la célula (6). Como consecuencia, se producen más proteínas de lo normal, lo que da lugar a una división celular incontrolada y al cáncer.

Cáncer de pulmón

Después de la transcripción del ADN (1), el ARN resultante experimenta un proceso de edición en su secuencia en el que la base adenina (A) es sustituida por otra denominada inosina (I) (2). En condiciones normales, tal modificación es introducida por la enzima ADAR1 y sirve para controlar las mutaciones del ARN, con lo que se genera un ARN normal (3) que da lugar a una proteína normal (4). En el cáncer de pulmón, se ha descubierto que la enzima ADAR1 se halla alterada e introduce excesivos cambios de A por I (5). Como consecuencia, la traducción del ARNm da lugar a proteínas anómalas (6) que promueven la división celular incontrolada y el cáncer.



EN ESTA CÉLULA, correspondiente a una línea celular de cáncer de pulmón, se observa que el gen *ADAR1* (verde) presenta un número excesivo de copias. Debido a esta anomalía, la proteína ADAR1 añade al ARN más modificaciones de las que debería, lo que en última instancia da lugar al desarrollo del cáncer. Para visualizar el gen de interés se ha empleado la técnica de la hibridación fluorescente in situ (FISH, por sus siglas en inglés). En rojo se aprecia un gen de control con sus dos copias normales.

de la citosina del ARN puede estudiarse a través de una reacción que primero se utilizó para identificar la citosina metilada del ADN. Sin embargo, carecemos de una técnica equivalente para conocer la metilación de la adenina en el ARN. Muchas veces se recurre al empleo de anticuerpos que actúan contra estas marcas del ARN o contra las proteínas que interactúan con ellas, con lo que se pierde especificidad. Y con frecuencia resulta imposible utilizar técnicas rápidas y sencillas de biología molecular para detectarlas, como la reacción en cadena de la polimerasa; en lugar de ello se necesitan técnicas altamente complejas, como la espectrometría de masas. Sin duda, deberá producirse una nueva revolución técnica que permita avanzar en esta área, y quizá los ultrasecuenciadores de cuarta generación ofrezcan una solución válida.

EPITRANSCRIPTOMA Y CÁNCER

El epitranscriptoma podría representar el eslabón perdido que desde el genoma, el epigenoma y el transcriptoma lleve hasta el proteoma. Todavía hay que seguir profundizando en su estudio. Pero sí hay una idea clara que se desprende de los estudios recientes: el epitranscriptoma se halla alterado en el cáncer.


En el síndrome llamado disqueratosis congénita, en el que las personas que lo sufren presentan un elevado riesgo de desarrollar un tumor, se ha identificado una mutación en un gen que codifica la pseudouridín sintasa. Esta enzima se encarga de «escribir» una modificación en la uridina del ARN, con lo que origina la pseudouridina. Sin esta modificación no se sintetizan correctamente ciertas proteínas supresoras de los tumores y, como consecuencia, aparece el cáncer.

Y en un cáncer de riñón denominado tumor de Wilms existen mutaciones en un gen responsable de una proteína que elimina las colas de poliuracilos de los ARN. Falla, pues, en este caso el mecanismo epitranscriptómico que se encarga de «borrar» las marcas del ARN.

Nuestro grupo ha proporcionado dos ejemplos más que indiquen una asociación entre alteraciones en el epitranscriptoma y la aparición del cáncer. En un estudio publicado en agosto en la revista *Oncogene*, observamos que en alrededor de un 15 por ciento de los tumores de pulmón se producen copias extra del gen *ADAR1*, responsable de editar el ARN. Los pacientes con esta anomalía muestran un transcriptoma «supereditado», con un exceso de guaninas donde debería haber adeninas.

El segundo ejemplo hace referencia a un subtipo de leucemia denominado leucemia aguda linfoblástica de tipo T. En un artículo publicado en la revista *Leukemia*, describimos que la enzima encargada de eliminar la marca química del extremo inicial del ARN presenta una actividad insuficiente a causa de un mecanismo epigenético (la hipermetilación del ADN). Como consecuencia de ello, los ARN de ciertos oncogenes no se degradan, se estabilizan y contribuyen al desarrollo de este tumor hematológico.

Nos hallamos aún en los albores de la aplicación de la epitranscriptómica a la medicina y la oncología, pero podemos vislumbrar algunos destellos. Ya existen pruebas diagnósticas basadas en el estudio de biopsias sólidas o líquidas (sangre) para detectar cambios del epitranscriptoma asociados al desarrollo tumoral en pacientes de alto riesgo. También se están desarrollando fármacos dirigidos contra las mutaciones activadoras de los genes encargados de añadir, quitar y leer las modificaciones químicas del ARN. Incluso no es descabellado pensar que fármacos ya existentes estén actuando en parte gracias a un mecanismo epitranscriptómico. Por poner un ejemplo, los medicamentos epigenéticos llamados inhibidores de la metilación del ADN, que están siendo usados para tratar ciertas formas de leucemia y linfoma, reactivan genes supresores tumorales. Y lo hacen a nivel del ADN, pero podrían estar también interfiriendo en la metilación del ARN. Por tanto, su efecto beneficioso podría deberse también a este componente epitranscriptómico.

Parece que hayamos avanzado mucho, pero no es así. Solo hemos sacado a la luz la cúspide de una inmensa pirámide enterrada en la arena bajo nuestros pies. Aunque la comprensión del epitranscriptoma haya empezado a dar sus primeros pasos, parece ser que su contribución a entender la biología de nuestras células, así como su disfunción en patologías humanas, va a ser como mínimo igual de importante que la del genoma, el epigenoma, el transcriptoma o el proteoma. Una tarea que exigirá la dedicación de muchas generaciones de jóvenes científicos. 

PARA SABER MÁS

Messenger RNA modifications: Form, distribution and function.

W. V. Gilbert, T. A. Bell y C. Schaening en *Science*, vol. 352, págs. 1408-1412, junio de 2016.

Gene amplification-associated overexpression of the RNA editing enzyme ADAR1 enhances human lung tumorigenesis.

C. A. Anadón et al.

en *Oncogene*, vol. 35, págs. 4407-4413, agosto de 2016.

The epitranscriptome of noncoding RNAs in cancer.

Manel Esteller y Pier

Paolo Pandolfi. *Cancer Discovery*, vol. 7, n.º 4, págs 1-10, marzo de 2017.

Epigenetic loss of the RNA decapping enzyme NUDT16 mediates C-MYC activation in T-cell acute lymphoblastic leukemia.

C. Anadón et al.

en *Leukemia*, vol. 31, págs. 1622-1625, julio de 2017.

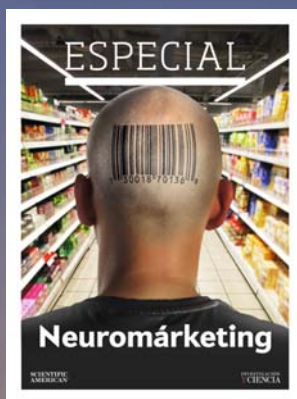
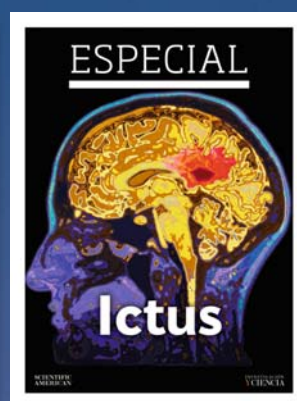
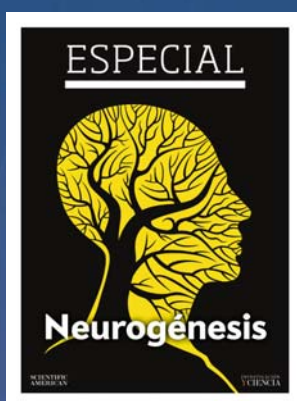
EN NUESTRO ARCHIVO

El epitranscriptoma, un nuevo giro de la epigenética. Cassandra Willyard en *JC*, septiembre de 2017.

ESPECIAL

MONOGRÁFICOS DIGITALES

Descubre los monográficos digitales que reúnen nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial



Prensa Científica, S.A.



En las buhardillas de los liceos

Fruto de un interminable periplo por los trasteros de los liceos, un hermoso libro nos presenta casi 1000 instrumentos que sirvieron para enseñar, a mediados del siglo XX, la física del siglo XVIII. Unos tesoros que deberíamos recuperar para nuestros modos de hoy

El balancín de Hardy, el pasa-vinos de Galileo, la prensa para lentillas de vidrio, el grafómetro de pínulas, la esfera destellante, el huevo eléctrico, el gran prisma de parafina, el morsófono, el pararrayos de cuernos, la regadera mágica, el corta-manzanas, la campana de vidrio de cuatros perlas... En colegios, liceos y universidades de toda Francia se guardan colecciones de extraños objetos. Desde 2003, la Asociación para la Conservación y el Estudio de los Instrumentos Científicos y Técnicos para la Enseñanza (ASEISTE, por sus siglas en francés) ha clasificado más de 55.000 instrumentos, procedentes de unos sesenta centros, de los que hemos confeccionado otras tantas fichas con los datos del lugar donde se inventarían. (ASEISTE colabora estrechamente con la institución española homóloga ANDPIH, la Asociación Nacional para la Defensa del Patrimonio de los Institutos Históricos). Este patrimonio, hoy presentado en una enciclopedia, es testimonio de un tiempo en que la enseñanza de la física se basaba en la experiencia.

La física experimental nace a mediados del siglo XVIII por influencia del abate Jean Antoine Nollet. En 1746, en Versalles, ante el rey Luis XV y su corte, el abate efectuó una experiencia que dejó huella: produjo una sacudida eléctrica en una hilera de 180 guardias agarrados de la mano. Desde entonces, fue requerido en todos los salones y en su curso de física se abarrotaba el aula, mientras los gabinetes de física se multiplicaban entre la nobleza y la burguesía.

Se desarrolló así el oficio de constructor de instrumentos y, en 1852, la enseñanza de la física en las clases, anecdótica frente a las humanidades clásicas, se afirmaba sobre una base sólida: el ministro francés de instrucción pública creó un plan de estudios en toda regla, recomendando «partir de la experiencia fundamental siempre que el tema lo permita», y asignó créditos cuantiosos para la compra de material científico.

Así se inició la era de oro de la construcción de instrumentos, que duró medio siglo y constituyó la parte esencial de los gabinetes de física y de historia natural de los liceos. Hoy, esos instrumentos resultan más que nunca de gran utilidad: ninguna pantalla ni ningún libro fijarán los fenómenos físicos en las mentes de los alumnos mejor que su percepción directa. ■

© Pour la Science

FRANCIS GIRES. LICEO BERTAN-DE-BORN, PÉRIGUEUX / TODAS LAS IMÁGENES DE LOS GRABADOS SON DE FRANCIS GIRES

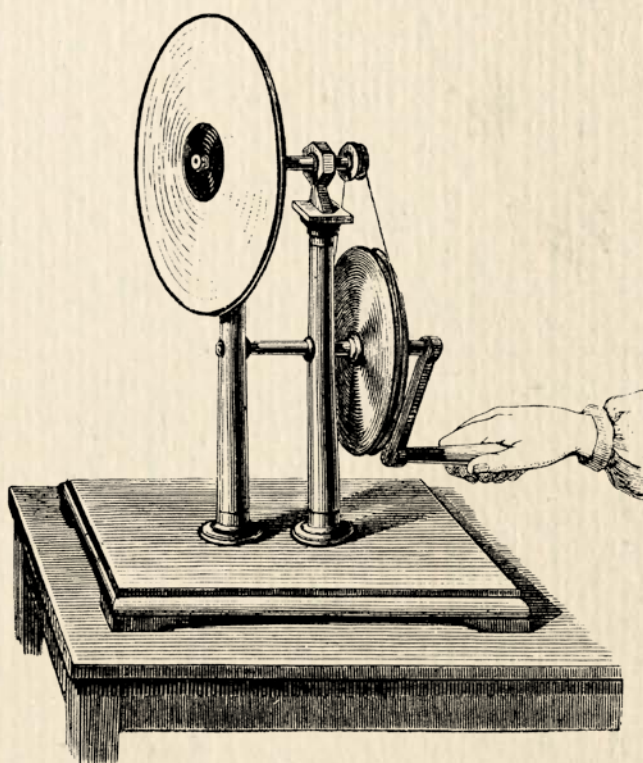


Francis Gires, presidente de la Asociación para la Conservación y el Estudio de los Instrumentos Científicos y Técnicos para la Enseñanza, en Francia, ha dirigido la publicación de la *Encyclopédie des instruments de l'enseignement de la physique du XVIII^e siècle au milieu du XX^e siècle* (puede adquirirse en www.aseiste.org).



DISCO DE NEWTON

Este instrumento inspirado en la teoría de los colores de Newton muestra que la superposición de las radiaciones visibles del espectro solar reconstruye la luz blanca. El disco está dividido en sectores pintados de los colores del espectro solar en el orden natural y con superficies ajustadas. Montado en un soporte provisto de dos poleas enlazadas por una correa sin fin, el disco se hace girar con ayuda de una manivela. Cuando gira rápido, en la retina se forman sucesivamente las imágenes de los colores, pero en virtud de la persistencia retiniana, la luz se percibe como blanca. Si las superficies están mal ajustadas, el disco adquiere el color, aunque más pálido, del sector cuya superficie es excesiva.



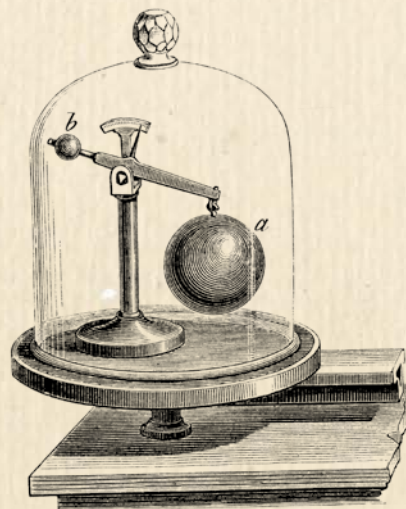
HEMISFERIOS DE MAGDEBURGO

Estos dos hemisferios de latón huecos evidencian el vacío. Sus bordes, provistos de una arandela de cuero recubierta de sebo, forman un contacto hermético. El hemisferio inferior lleva un grifo; el otro, un aro que hace de empuñadura. Inicialmente, ambas piezas no son solidarias. El hemisferio inferior se atornilla a una bomba de vacío y sobre él se coloca el hemisferio superior. Con la bomba en marcha, el aire se rarifica dentro de los hemisferios. Se cierra el grifo y se retira la bomba. Entonces es imposible separar los hemisferios: la presión atmosférica exterior los mantiene unidos. En cambio, cuando se abre el grifo, el aire rellena los hemisferios, que entonces se separan fácilmente: la presión se ha igualado en ambas caras de la pared. El físico alemán Otto von Guericke, burgomaestre de Magdeburgo, presentó esta experiencia en 1640 al emperador Fernando III: tiros de quince caballos no consiguieron separar dos hemisferios de 50 centímetros de diámetros. ¡La noticia corrió por toda Europa!



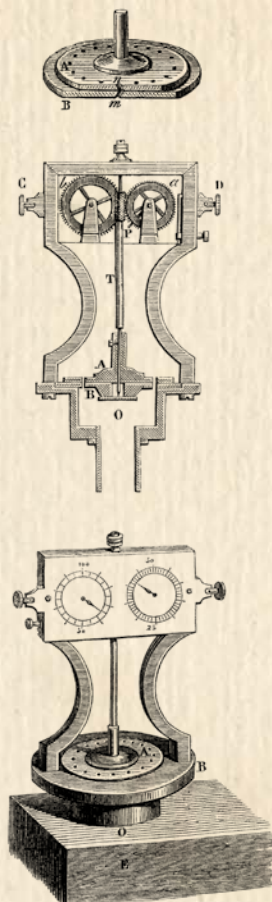
BAROSCOPIO

Según el principio de Arquímedes, todo cuerpo sumergido en un fluido sufre un empuje vertical hacia arriba que depende del volumen de fluido desalojado. Tal hecho lo evidencia este astil, que lleva en sus extremos sendos cuerpos (a y b) de volúmenes diferentes. Una vez equilibrado el baroscopio en el aire, se introduce en la campana de una bomba de vacío. Cuando el aire se enrarece, el astil se inclina del lado del cuerpo más voluminoso (a), toda vez que desaparece el empuje del aire que lo sostenía.

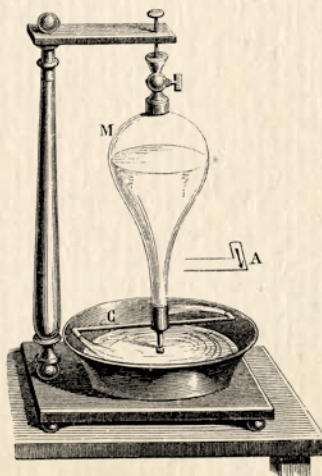


SIRENA DE CAGNIARD DE LATOUR

Este aparato lo inventó en 1819 el físico francés Charles Cagniard de Latour para medir la frecuencia de un sonido. La sirena se compone de una caja cilíndrica *O* (cuya base está comunicada con un ventilador), un disco móvil *A* y un cuenta-vueltas (*parte superior*). La tapa *B* de la caja lleva dieciocho taladros inclinados (*m*), el mismo número de taladros inclinados en sentido inverso (*n*) que lleva el disco móvil. El eje central *T*, que es solidario del disco, arrastra unas ruedas dentadas (*a* y *b*) enlazadas a sendas agujas que indican sobre cuadrantes el número de revoluciones que da el disco. Cuando se insufla aire a la caja el disco *A* gira. Cada vez que sus taladros coinciden con los de la tapa *B*, el aire que los recorre vibra. Se emite así un sonido, cuya frecuencia se obtiene multiplicando el número de orificios del disco por el número de vueltas que da el mismo en un segundo. Para hallar la frecuencia de un sonido emitido por un instrumento, hay que poner la sirena al unísono del instrumento actuando sobre el ventilador. ¡Se trata, pues, de poseer un buen oído!



FRANÇOIS GIRET, LUCO BERTRAN-DE-BORN, PÉRIEUX (Sirena de Cagniard-Latour); FRANÇOIS GIRET, LUCO GUEZ-DE-BALZAC, ANGLEMA (Aspersor hidráulico)



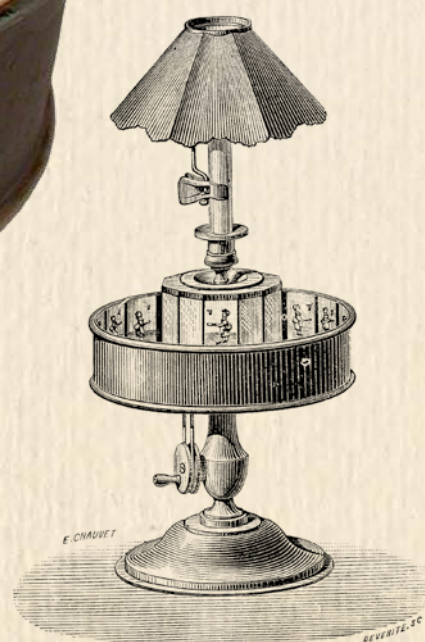
ASPERSOR HIDRÁULICO

¿Sabe usted cómo funciona un aspersor de riego? Gracias a las fuerzas de presión que el líquido ejerce sobre las paredes del aparato, como en el instrumento contiguo: un recipiente *M* móvil en torno a un eje vertical, provisto de un pequeño orificio en la punta y de dos tubos *C* horizontales acodados en la base. Cuando se llena el recipiente, el aparato gira mientras fluye el agua: el aire que penetra durante el movimiento del agua presiona sobre esta, la cual, a su vez, presiona sobre las paredes del recipiente y de los tubos. De este modo, en los tubos aparecen unos pares de fuerzas, que rotan y mueven el recipiente.



PRAXINOSCOPIO DE REYNAUD

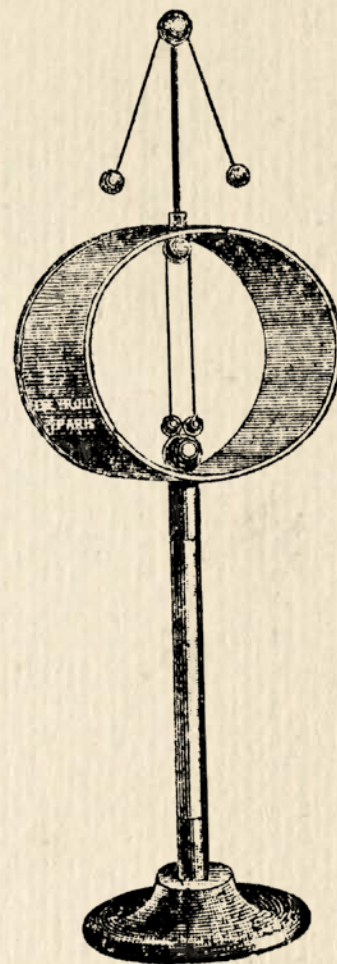
Émile Reynaud, enseñante-conferenciante de ciencias, inventó este juguete óptico en 1876. Compuesto de un tronco de cono con doce espejos enfrentados a una tira con doce dibujos que muestran las distintas fases de una acción, produce la ilusión de que aquella prosigue mientras se hace girar la tira mediante una manivela: las imágenes se suceden tan rápido que los espectadores que las ven desfilar sobre el cono de espejos observan un movimiento continuo a causa de la persistencia de las impresiones luminosas en la retina. Una bujía rodeada de una pantalla difusora facilita el funcionamiento incluso de noche.





CILINDRO DE MASCART

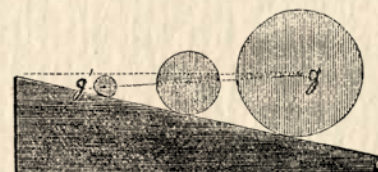
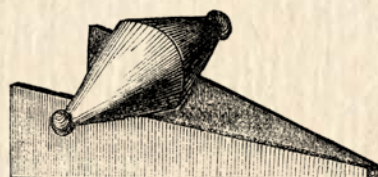
Durante una tormenta, la electricidad atmosférica se queda en la superficie de las carrocerías de los automóviles y en la de los fuselajes de los aviones, y los pasajeros están a salvo. Este es el fenómeno que pone de manifiesto el dispositivo ideado por Éleuthère Mascart, profesor de física en el Colegio de Francia, en la segunda mitad del siglo XIX. Un cilindro hueco conductor de latón está aislado sobre un pedestal de madera. En la vertical de este, una varilla metálica, fija al cilindro, lleva dos péndulos eléctricos (dos bolitas de médula de saúco colgadas de sendos hilos de lino). En el cilindro hay otros dos péndulos en contacto con la superficie interior. Cuando se electriza el cilindro, los péndulos exteriores se separan de inmediato, mientras que los del interior no se mueven. Se concluye que solo está cargada la superficie exterior. Las cargas eléctricas que lleva la superficie exterior no ejercen influencia alguna en ningún punto del interior del conductor, el cual forma una pantalla eléctrica para todo lo que contiene.



DOBLE CONO DE NOLLET

«Es más fácil encontrar plata que un hombre como él», decía Voltaire del abate Jean Antoine Nollet, uno de los más grandes divulgadores científicos europeos del siglo XVIII. La demostración del bicono es una de las numerosas experiencias de física descritas por primera vez en Francia en sus obras. Ilustra el hecho de que la estabilidad de un cuerpo corresponde a la posición más baja de su centro de gravedad, incluso si el movimiento que conduce a esa posición contradice la intuición.

El artefacto lo forman un doble cono y dos tablas iguales unidas en ángulo agudo. Los bordes superiores de las tablas constituyen una suerte de plano inclinado; el bicono se coloca en la parte inferior de ese plano inclinado. Entonces «sube» por aquel girando, ejecutando así un movimiento en apariencia contrario al de los cuerpos pesados. Pero si en el curso del movimiento se mide la altura del centro de gravedad del bicono, se comprueba que disminuye. En otras palabras, el centro de gravedad desciende no poco cuando el bicono remonta la pendiente, y así queda validada la ley del movimiento de los cuerpos pesados.





Cómo detectar y corregir errores (II)

Códigos eficientes y el problema del empaquetamiento de esferas

En mi última columna [«Cómo detectar y corregir errores», por Alejandro Pérez Carballo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2017] nos preguntábamos por códigos apropiados para enviar mensajes a través de un canal ruidoso; es decir, con posibles errores de transmisión. Vimos que tales códigos estaban sujetos a tres condiciones. En primer lugar, el receptor ha de poder saber si el mensaje se ha corrompido o no durante la transmisión. Segundo, en caso de que se hayan producido errores, el receptor tiene que poder reconstruir el mensaje original. Por último, nos gustaría que el código fuese lo más eficiente posible. Como vimos, la idea general consistía en introducir algún tipo de redundancia en el mensaje original; sin embargo, no queremos vernos obligados a emplear una gran cantidad de bits para comunicar un mensaje sencillo.

Recordemos algunas definiciones que introdujimos entonces. Llamamos «secuencia corta» a cada mensaje inicial posible; en nuestro ejemplo, tales secuencias constaban de 4 bits. Un código de longitud $k > 4$ consiste en una función que, a cada secuencia corta, le asigna una de k bits. Por último, dada una secuencia de k bits cualquiera, diremos que es «limpia» si coincide con una de las que nuestro código asigna a las secuencias cortas. El problema con el que concluimos la columna anterior planteaba diseñar un código de longitud 7 que nos permitiese enviar mensajes de longitud 4 a lo largo de un canal de transmisión que, debido al ruido, puede alterar uno de los bits enviados.

Antes de analizar una solución, vale la pena tomar un pequeño desvío para observar un aspecto bastante curioso de nuestro problema.

Empaquetamiento de esferas

Dadas dos secuencias cualesquiera de longitud k , s y s' , llamaremos $d(s, s')$ al número de posiciones en las que s y s'

difieren. Por ejemplo, para el caso $k = 7$, podemos ver que:

$$d(0100111, 0100110) = 2$$

y

$$d(0000000, 1111111) = 7.$$

Nuestra función d satisface tres propiedades interesantes. Primero, para dos secuencias cualesquiera:

$$d(s, s') \geq 0,$$

con $d(s, s') = 0$ si y solo si $s = s'$. Segundo:

$$d(s, s') = d(s', s).$$

Por último, para tres secuencias cualesquiera s , t y u :

$$d(s, u) \leq d(s, t) + d(t, u).$$

Desde un punto de vista abstracto, cualquier función que cumpla estas propiedades merece ser llamada «función de distancia», ya que satisface todas las propiedades esenciales de nuestra noción usual de distancia geométrica. Por tanto, podemos pensar en el conjunto de secuencias de longitud k como en un espacio con un número finito de puntos (a saber, 2^k puntos) y podemos usar nuestra función d para medir, en un sentido preciso, cuán «lejos» o «cerca» se encuentran dos puntos en nuestro espacio.

Para cada secuencia s , podemos definir la bola de radio 1 centrada en s como el conjunto de puntos en el espacio de secuencias que se encuentran a una distancia de s menor o igual que 1. Por ejemplo, la bola de radio 1 centrada en 0000000 viene dada por todas las secuencias que contienen a lo sumo un uno; es decir:

0000000, 1000000, 0100000, 0010000, ...

Para resolver nuestro problema, lo primero que hemos de hacer es asociar, a cada mensaje inicial de 4 bits, una secuencia de 7 bits. Por tanto, dado que nuestro conjunto de secuencias cortas contiene $2^4 = 16$ elementos, hemos de definir 16 secuencias distintas de 7 bits.

Sabemos también que, al enviar una secuencia de 7 bits, el receptor obtendrá una que diferirá de ella en, a lo sumo, una posición. De modo que, si enviamos una secuencia limpia s , podemos estar seguros de que la que le llegará al receptor se encontrará dentro de la bola de radio 1 centrada en s .

Para que el receptor pueda reconstruir la secuencia limpia que le hemos enviado, tendremos que evitar que haya dos secuencias limpias s y s' tales que las bolas de radio 1 centradas en ellas posean elementos en común. De lo contrario, nuestro amigo podría recibir una secuencia de 7 bits cuya distancia a dos secuencias limpias diferentes fuese 1, en cuyo caso le sería imposible determinar cuál fue la secuencia enviada.

Dicho de otro modo: nuestro problema consiste en encontrar una manera eficiente de distribuir 16 bolas de radio uno, centradas en las secuencias limpias, de manera que no haya dos que tengan elementos en común. Esto sugiere —y, si bien la conexión no es tan inmediata como pudiera parecer, la idea resulta ser correcta— que nuestro cometido guarda relación con el viejo problema de buscar la manera más eficiente de empaquetar esferas en un espacio euclídeo de dimensión dada.

Dicho problema cuenta con una historia interesante. En 1611, Johannes Kepler conjeturó que la manera más eficiente de disponer esferas en el espacio euclídeo tridimensional vendría dada, en esencia, por el método que usan los fruteros para apilar naranjas. Sorprendentemente, y aunque parece un problema sencillo, la solución no llegó hasta 1998, cuando el matemático Thomas Hales, por entonces en la Universidad de Michigan, obtuvo una demostración de la conjetura de Kepler (una que, vale añadir, se basa de manera esencial en el uso de ordenadores). De hecho, si generalizamos el empaquetamiento de esferas a otras dimensiones,

nos encontraremos con problemas matemáticos importantes que pueden resolverse utilizando códigos similares al que veremos a continuación.

El código de Hamming

Volvamos a nuestro problema inicial. Lo que necesitamos es un conjunto C de 16 puntos en nuestro espacio de secuencias de longitud 7 con la siguiente propiedad: para cada par s, s' en C , la distancia entre s y s' ha de ser siempre mayor o igual que 3. Si encontramos un conjunto así, bastará con que asociemos cada secuencia corta con un elemento de C , el cual sería entonces nuestro conjunto de secuencias limpias. En tal caso, si el receptor sabe cuáles son dichas secuencias y conoce el código, podrá recuperar siempre el mensaje inicial sea cual sea la secuencia recibida.

Ello se debe a que, con esta elección de C , ninguna secuencia recibida podrá estar nunca en las bolas de radio 1 centradas en dos secuencias limpias diferentes. De lo contrario, habría una secuencia s^* y dos secuencias limpias $s \neq s'$ tales que $d(s, s^*) = d(s^*, s') = 1$. Pero, puesto que d es una función de distancia, tendríamos que:

$$d(s, s') \leq d(s, s^*) + d(s^*, s') = 2,$$

lo que contradice la propiedad característica de C . Y como cada secuencia recibida ha de encontrarse a una distancia menor o igual que 1 de una secuencia limpia, el receptor siempre podrá reconstruir la secuencia enviada a partir de la recibida: a saber, la única secuencia de C que se halle en la bola de radio 1 que contiene a la secuencia recibida. Pero ¿cómo obtener tal conjunto?

Una estrategia bastante tediosa consiste en proceder por fuerza bruta: tomar una secuencia de 7 bits cualquiera, buscar otra que esté a distancia mayor o igual que 3 de ella, después buscar otra que se halle a una distancia mayor o igual que 3 de cualquiera de las dos anteriores, y así sucesivamente. Sin embargo, muy pronto nos veremos en dificultades: para escoger la décima secuencia, por ejemplo, tendríamos que verificar que se halla a distancia mayor o igual que 3 de cada una de las nueve anteriores. No le recomendaría usar este método.

En este caso conviene seguir una estrategia diseñada en 1950 por el matemático Richard Hamming, por entonces en los Laboratorios Bell. Esta se basa en emplear



NARANJAS Y TEORÍA DE LA INFORMACIÓN:

El diseño de códigos eficientes y robustos frente a errores de transmisión guarda relación con la manera más eficiente de empaquetar esferas. En 1611, Johannes Kepler conjeturó que la solución vendría dada por el método que emplean los frutereros para apilar naranjas. La demostración formal de la conjetura, sin embargo, tuvo que esperar hasta 1998.

de forma ingeniosa la noción de paridad asociada a una secuencia de dígitos.

Recordemos que la paridad de una secuencia binaria es 0 si y solo si contiene un número par de unos; en caso contrario, es 1. (La paridad de una secuencia s también puede verse como la suma módulo 2 de los elementos de s .) Como vimos en la columna anterior, si a una secuencia dada le añadimos un dígito correspondiente a su paridad, siempre será posible detectar si hubo un error en la transmisión. Para encontrar nuestro conjunto C , generalizaremos este método.

Consideremos una secuencia corta cualquiera s . A partir de ella, queremos construir otra de longitud 7. Para ello añadiremos primero un dígito que indique la paridad de los tres primeros elementos de s ; luego agregaremos otro correspondiente a la paridad del primer, tercer, y cuarto elemento; por último, añadiremos otro que represente la paridad de los tres últimos elementos de s . Si, por ejemplo, nuestra secuencia corta era 1001, la secuencia de 7 bits correspondiente vendrá dada por:

1001101.

En general, a cada secuencia corta (x_1, x_2, x_3, x_4) asociaremos otra:

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, p_{123}, p_{134}, p_{234}),$$

donde p_{123} corresponde a la paridad de (x_1, x_2, x_3) , p_{134} a la de (x_1, x_3, x_4) y p_{234} a la de (x_2, x_3, x_4) . De esta manera, tendremos un conjunto C_H formado por 16 secuencias de 7 dígitos, cada una de las cuales consta de cuatro bits «de datos» seguidos

de otros tres «de paridad». Solo basta verificar que dos elementos cualesquiera de C_H se encuentran siempre a una distancia mayor o igual que 3.

Consideremos dos secuencias arbitrarias de C_H :

$$(x_1, x_2, x_3, x_4, p_{123}, p_{134}, p_{234})$$

$$(x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, p'_{123}, p'_{134}, p'_{234}).$$

Por construcción, sabemos que deben diferenciarse en al menos uno de los bits de datos. Sin pérdida de generalidad, supongamos que difieren en la primera posición: $x_1 \neq x'_1$. Veamos ahora qué sucede con p_{123} , p_{134} , p'_{123} y p'_{134} , los bits de paridad de las secuencias que contienen a x_1 y a x'_1 , respectivamente.

Si $p_{123} \neq p'_{123}$ y $p_{134} \neq p'_{134}$, habremos terminado: nuestras secuencias difieren en al menos 3 dígitos, por lo que su distancia será mayor o igual que 3.

Si no ocurre así, entonces ambas secuencias han de coincidir en al menos uno de los dos bits de paridad. Supongamos que se trata solo del primero; es decir, $p_{123} = p'_{123}$ y $p_{134} \neq p'_{134}$ (si coincidiesen solo en el segundo, podríamos usar un razonamiento análogo). Dado que $x_1 \neq x'_1$, podemos concluir que la paridad de (x_2, x_3) ha de ser distinta de la de (x'_2, x'_3) . Y esto implica que, o bien $x_4 \neq x'_4$, o bien la paridad de (x_2, x_3, x_4) , que se ve reflejada en p_{234} , ha de ser distinta de la de (x'_2, x'_3, x'_4) , que se ve reflejada en p'_{234} . En ambos casos, tenemos que nuestras secuencias difieren en al menos tres posiciones.

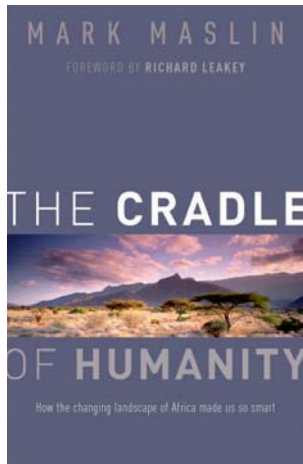
Solo falta comprobar que si ambas secuencias coinciden en los dos primeros bits de paridad, habrá dos posiciones (además del primer bit de datos) en las que las secuencias difieran. Dejamos esta última etapa como ejercicio para el lector. ■

PARA SABER MÁS

El artículo clásico de Hamming es **Error detecting and error correcting codes**, *The Bell System Technical Journal*, vol. 29, n.º 2, págs. 147-160, abril de 1950. Una discusión más detallada y relativamente accesible de la relación entre sistemas para detectar y corregir errores y el empaquetamiento de esferas, incluido un análisis de la historia de ambos problemas, aparece en el libro de Thomas Thompson **From error-correcting codes through sphere packings to simple groups**, Cambridge University Press, 2004.

EN NUESTRO ARCHIVO

Preguntas y respuestas. Gabriel Uzquiano en *lyC*, septiembre de 2013.



**THE CRADLE OF HUMANITY
HOW THE CHANGING LANDSCAPE OF AFRICA
MADE US SO SMART**

Mark Maslin
Oxford University Press, 2017

Las cunas de la humanidad

*Una visión de las transiciones que
condujeron al origen de nuestra especie*

Para formar un planeta habitable se requieren una estrella de larga vida, una órbita estable, una ubicación a la distancia correcta del astro, de suerte que el planeta no se encuentre demasiado caliente ni demasiado frío, así como agua y carbono en la superficie. Esas vendrían a ser las condiciones necesarias. Para el advenimiento de *Homo sapiens* se exigieron, además, numerosas transiciones clave que terminarían por entregarle el dominio del planeta entero.

La primera fue la transición de lo inerte a lo vivo. Mark Maslin recuerda el testimonio de estructuras celulares procedentes de la formación australiana de Strelley Pool, de hace unos 3460 millones de años. Con posterioridad a la publicación del libro se han descubierto microfósiles más antiguos, de hace entre 4280 y 3770 millones de años, en una formación rocosa de Quebec. Se trata de tubos y filamentos de hematites que apuntarían a restos de bacterias que medraron en chimeneas hidrotermales submarinas.

Hace 2400 millones de años se produjo el episodio de la Gran Oxidación. Hasta entonces solo hubo en la Tierra organismos procariotas. Aquellos dotados de núcleo diferenciado, los eucariotas, emergieron hace entre 2100 y 1600 millones de años, tras la fusión de dos tipos de procariotas, de acuerdo con la tesis esbozada por Lynn Margulis sobre la simbiosis. Constituyen la base de todos los organismos multicelulares.

Se supone que los especímenes animales más simples se abrieron paso hace 600 millones de años. Sin embargo, los grandes *phyla* aparecieron durante el período de rápida diversificación en la explosión del Cámbrico, el cual comenzó hace unos 541 millones de años —inicio de lo que se

conoce como eón Fanerozoico— y duró unos 40 millones de años. Algunas de las formas extraordinarias que existieron durante ese tiempo quedaron registradas en las comunidades de Burgess Shale y en las de Chengjiang. Esa asamblea de organismos incluía una rama, los vertebrados, que adquirieron médula ósea.

Transición determinante también fue la extinción de los dinosaurios, hace unos 66 millones de años. Durante un período de intensa actividad volcánica se arrojaron cantidades ingentes de lava; estas produjeron los traps del Decán y, combinado con el impacto meteorítico en Chicxulub, causaron una mortandad generalizada. Con todo, la extinción permitió la evolución y proliferación de mamíferos y la emergencia de los primeros antepasados de los primates. Rasgos exclusivos de los mamíferos son las glándulas mamarias, productoras de leche, y poseer pelo o cuero, así como tres huesos en el oído interno —los cuales evolucionaron a partir de la mandíbula de los reptiles— y neocorteza. Esta constituye una región del cerebro que controla las funciones superiores, como la percepción sensorial, la generación de órdenes motoras, el razonamiento espacial y, en los humanos, el pensamiento consciente y el lenguaje.

Unos diez millones de años después de la extinción de los dinosaurios, durante un período de un notable calentamiento global, comenzaron a aparecer los antropoides (primates y monos). Empezaron a vivir en grupos extensos, lo que significaba que cada animal tenía que negociar redes complejas de amistad, jerarquía y rivalidad. Se supone que eso tuvo una incidencia crucial en la adquisición de un cerebro más poderoso en los homínidos,

nuestros antepasados (*Ardipithecus*, *Australopithecus*, *Homo*).

La tectónica causa cambios significativos en el clima, hidrología y cubierta vegetal, global y regionalmente. El cambio climático a largo plazo ocurrido en África oriental estaba controlado por la formación progresiva del valle del Rift, que condujo a una aridez creciente, una fragmentación de la vegetación y el desarrollo consiguiente de cuencas lagunares. Hubo períodos de variabilidad climática extrema cada 400.000 u 800.000 años. Los cambios ambientales afectarían de manera diferente a las especies especialistas y a las generalistas. Durante los períodos secos, las tasas de extinción de los organismos especialistas aumentarían a medida que tuvieran que luchar por el alimento, tras perder su nicho ecológico y su ventaja competitiva. Por el contrario, las especies generalistas sufrirían una tasa menor de extinción porque estarían más adaptadas a la búsqueda de alimentos en períodos estresantes [véase «Cambios climáticos y evolución humana», por Peter B. deMenocal; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2014].

El origen exacto de los homínidos es objeto de controversia. Entre hace diez y cinco millones de años adquirieron capacidad de deambular. Contemporáneamente, chimpancés y gorilas se desenvolvían mejor trepando por los árboles y apoyándose en los nudillos cuando estaban en el suelo. El bipedalismo permitió a nuestros antepasados salir de su enclave en el oriente africano. Algunos de estos primeros homínidos utilizaban ya herramientas de piedras hace, al menos, unos 3,3 millones de años. Hace unos dos millones de años aparecieron nuevas especies de homínidos cuyo cerebro había crecido un 8 por ciento con respecto al de sus antepasados. Por vez primera, se aventuraron fuera de África. Ese mayor cerebro vino acompañado por otros cambios que afectaron a la historia vital (acortamiento del intervalo entre nacimientos), tamaño corporal, forma de la pelvis y una morfología de los hombros que propiciaría el uso de proyectiles. Estas especies se adaptaron a largas caminatas, adquirieron flexibilidad ecológica y conducta social, incluido el procesamiento de la alimentación [véase «A golpe de suerte», por Ian Tattersall; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2014].

Los descubrimientos de los últimos decenios han incrementado de manera notable el registro fósil de homínidos. Desde 1987 se ha sugerido la incorporación de 13

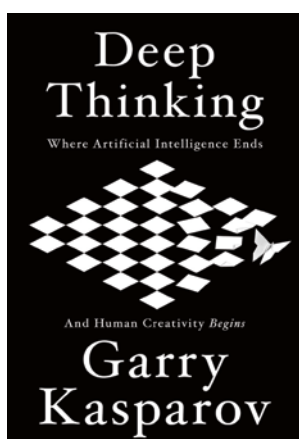
especies y cuatro géneros nuevos. Sobresalen los hallazgos de Atapuerca, Dmanisi (Georgia), Hadar (Etiopía) y Rising Star (Sudáfrica). Merced al refinamiento de nuevas técnicas de datación se ha ido alcanzando una mayor precisión cronológica que vincula fenotipos con el entorno. Agreguemos que el análisis genético ha sacado a la luz la existencia de un fluido intercambio sexual entre especies de homínidos, lo que ha supuesto el cuarteamiento de los rígidos árboles filogenéticos [véase «Híbridos humanos», por Michael F. Hammer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2013].

Tras la aparición de los protohomínidos, representados por *Sahelanthropus*, *Orrorin* y *Ardipithecus*, hace entre cuatro y siete millones de años, llegaría el género *Australopithecus*, hace unos cuatro millones de años. Emergerían luego los géneros *Homo* y *Paranthropus*, en torno a la frontera Plioceno-Pleistoceno, hace entre 2,8 y 2,5 millones de años. *Homo erectus* entraría en escena hace 1,8 millones de años y *Homo heidelbergensis*, hace unos 800.000 años.

Por fin, hace unos 200.000 años, emergió *Homo sapiens* en África oriental. Se

dispersó luego por Eurasia. Hasta hace 100.000 años no afloran indicios de creatividad, que comienzan a consolidarse desde hace 50.000 años en manifestaciones de arte, ornamentación y pensamiento simbólico, expresiones que van ganando en complejidad y frecuencia. Demuestran que se generaba conocimiento que se transmitía a la generación siguiente. La cultura se estaba haciendo acumulativa y crecía con cada nueva generación. Y empezó la agricultura, luego la urbanización y, por fin, la ciencia.

—Luis Alonso



DEEP THINKING
WHERE MACHINE INTELLIGENCE ENDS
AND HUMAN CREATIVITY BEGINS

Garri Kaspárov
PublicAffairs, 2017

La inteligencia humana contra la inteligencia artificial

El excampeón del mundo de ajedrez Garri Kaspárov reflexiona sobre su célebre enfrentamiento con Deep Blue

Hace casi veinte años tuve la suerte de jugar unas partidas amistosas de ajedrez rápido contra Garri Kaspárov, campeón del mundo de ajedrez entre los años 1985 y 2000. Fue toda una experiencia: su espíritu competitivo y su genio creativo eran palpables. Hacía poco que había fundado Elixir Studios, una compañía especializada en juegos e inteligencia artificial (IA), y mi ambición era hacer investigación de primera línea en el campo. La IA estaba en mi cabeza ese día: Kaspárov había jugado contra el superordenador de IBM Deep Blue unos años antes. Ahora, el mismo Kaspárov relata aquella titánica batalla en *Deep thinking*.

El encuentro de 1997 supuso un punto de inflexión para la IA. A pesar de que Kaspárov perdió (por 2,5 frente a 3,5 en un total de seis partidas), me impresionaron más las facultades del cerebro humano que las de la máquina. Kaspárov fue capaz de competir contra un leviatán computacional usando las habilidades que caracterizan de modo indistinguible a los humanos. Deep Blue estaba programado con una serie de reglas fijas diseñadas

por grandes maestros de ajedrez, acompañadas de un algoritmo de búsqueda por fuerza bruta. Había sido creado para hacer una sola cosa y era incapaz de acometer juegos mucho más sencillos, como el tres en raya, sin ser programado de nuevo. Me pareció que ese tipo de «inteligencia» carecía de varios ingredientes fundamentales, como la facultad de generalización, adaptabilidad o aprendizaje.

Tal y como nos revela en *Deep thinking*, Kaspárov llegó a conclusiones similares. El libro constituye la primera historia detallada del encuentro y ofrece profundas reflexiones sobre el papel de la tecnología. El título hace referencia a lo que Kaspárov cree que las máquinas no son capaces de hacer: pueden calcular, pero no innovar o crear. No pueden pensar en el sentido más profundo del término. Para llegar a tales conclusiones, Kaspárov presenta una historia de la IA profusa en detalles y analiza la permanente obsesión de esta disciplina con el ajedrez.

Durante décadas, eminentes teóricos de la computación creyeron que, dado el estatus tradicional del ajedrez como acti-

vidad intelectual, una computadora competente en este ámbito también lo sería en otros característicos de los humanos. El tiempo ha demostrado que no ha sido así. En parte, ello guarda relación con las diferencias entre humanos y máquinas: las computadoras pueden realizar con facilidad cálculos que las personas consideramos increíblemente difíciles, pero fracasan de manera estrepitosa en tareas que nos resultan sencillas y de sentido común [véase «Hacia una inteligencia artificial más humana», por Alison Gopnik, en este mismo número]. Este aspecto también se encuentra relacionado con la dinámica de la disciplina en los años ochenta y noventa: la búsqueda de resultados rápidos arrastró a los investigadores a optar por soluciones particulares y cortas de miras, basadas en la descomunal capacidad de cálculo de las máquinas.

Ese énfasis en la fuerza bruta demostró algunas ventajas, explica Kaspárov. Quizá no nos brindase máquinas inteligentes de propósito general, pero sí programas de ajedrez muy potentes que pronto se encontraron disponibles para todo el mundo. Hoy cualquiera puede jugar una partida contra un algoritmo capaz de vencer al mejor de los maestros, lo que ha permitido que aficionados de todo el mundo reciban un entrenamiento de primer nivel. Antes de Deep Blue, los más pesimistas predijeron que la derrota del campeón mundial a manos de un ordenador supondría la muerte del juego. Hoy, según cifras de la Federación Mundial de Ajedrez, este deporte cuenta con más practicantes que nunca.

Los programas de ajedrez también han ayudado a crear nuevas variantes del juego. En 1998, el propio Kaspárov introdujo el «ajedrez avanzado», en el que equipos formados por computadoras

y personas funden la potencia de cálculo de las máquinas con la capacidad humana para identificar pautas generales. La aceptación de Kaspárov de la tecnología que lo derrotó demuestra cómo las computadoras inspiran la creatividad humana, en lugar de hacerla innecesaria.

En *Deep thinking* Kaspárov explora el renacimiento del aprendizaje automático, un subdominio de la IA que busca algoritmos capaces de aprender a partir de datos [véase «Aprendizaje profundo», por Joshua Bengio; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2016]. Resalta las diferencias entre Deep Blue y AlphaGo, una máquina creada por mi compañía, DeepMind, para jugar al complejo juego del go y que el año pasado venció a Lee Sedol, ampliamente considerado como el mejor jugador de la pasada década. Mientras que Deep Blue era un autómatas que seguía instrucciones orquestadas por un grupo de ingenieros y maestros de ajedrez, AlphaGo jugó contra sí mismo numerosas veces, lo que le permitió aprender de sus errores y desarrollar nuevas estrategias. Varios de sus movimientos en el encuentro contra Lee no se habían visto antes en partidas entre humanos. En este sentido, destacó en

particular el movimiento 37 de la segunda partida, que acabó con siglos de sabiduría tradicional al jugar en la quinta línea en una fase temprana del juego.

Dado que los algoritmos de aprendizaje pueden generalizarse, AlphaGo posee el potencial de ir más allá del juego para el que fue creado. Kaspárov se deleita con este potencial y analiza aplicaciones en traducción automática o diagnóstico médico. La IA no reemplazará a los humanos, sostiene, sino que nos iluminará y enriquecerá al igual que pasó con el ajedrez hace veinte años. Su punto de vista cobra especial valor si tenemos en cuenta que proviene de alguien que cuenta con todas las razones para estar resentido con los progresos de la IA.

Su análisis sobre el encuentro con Deep Blue resulta fascinante. Es bien conocido que, después de una de las partidas, Kaspárov salió hecho una furia y dio una rueda de prensa en la que se quejó del secretismo de IBM sobre el equipo de Deep Blue y sus métodos, insinuando que la compañía podía haber hecho trampas. En *Deep thinking* el excampeón nos ofrece una visión única de sus estados de ánimo durante el encuentro. Hasta cierto pun-

to se reafirma su punto de vista anterior, argumentando que, aunque IBM probablemente no hiciera trampas, sí violó el espíritu de la competición ocultando información relevante. También aporta comentarios detallados de varios momentos clave; por ejemplo, cuando desmonta el mito de que el extraño movimiento 44 de Deep Blue en la primera partida le dejó desconcertado de manera irremediable.

Kaspárov incluye detalles suficientes para encandilar a los aficionados al ajedrez, al tiempo que emplea una apasionante narrativa capaz de atraer la atención del lector alejado del este deporte. *Deep thinking* ofrece un equilibrio poco común entre análisis y narrativa, con comentarios sobre el progreso tecnológico y con un punto de vista único de uno de los encuentros más importantes de la historia del ajedrez.

—Demis Hassabis

Fundador y ejecutivo de DeepMind

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 544, págs. 413-414, 27 de abril de 2017.

Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de **nature**



ESCRITOS SOBRE LA CIENCIA Y EL CIENTIFICISMO

Miguel de Unamuno
Preparado por Alicia Villar Ezcurra
Tecnos, 2017

Miguel de Unamuno

Ciencia y crisis

Este libro de Alicia Villar Ezcurra reúne los escritos en los que Unamuno expone su tan polémico pensamiento sobre la ciencia, la técnica y la ideología cientificista. Constituye un excelente trabajo de selección, edición y análisis interpretativo.

Quizá no haya palabra que refleje mejor el espíritu unamuniano que *crisis*. A finales del siglo XIX acontece la descomposición de una idea de España, una idea de Europa y una idea de ciencia. Se habla de la crisis de los fundamentos de la matemática, del

triunfo del paradigma biologicista-evolucionista ante la crisis del teleologismo, del triunfo del positivismo como reducto ante la crisis de una racionalidad amenazada. Y es el momento de la crisis personal de Unamuno, que configurará ya para siempre su agónica forma de ser. Todo hace mella en el inquieto espíritu del filólogo, filósofo, literato, humanista, político...

En relación con la ciencia aparece una cuestión decisiva, presente tanto en sus primeros trabajos de *Filosofía lógica* (re-

cientemente editados por Ignacio García Peña y Pablo García Castillo; Tecnos, 2016) como en los textos que se nos presentan en esta cuidada edición de Alicia Villar: hacer caso omiso a la ciencia es cerrarse a los avances sustanciales que se están produciendo en Europa en todos los órdenes; pero obsecarse en lo científico, cegarse en el paradigma positivista, vincular la racionalidad únicamente al ejercicio del método experimental, siempre de la mano del verificacionismo, supone cercenar la vida, la cual escapa a ese pobre patrón.

Por mucho que se pueda hablar de una evolución en el pensamiento unamuniano sobre la ciencia, desde una postura más positivista hasta una concepción más humanista, hay algo que se mantiene constante, y es el rechazo a que el modelo de las ciencias naturales pueda extenderse sin más a todas las áreas del conocimiento. La confianza en el poder de transformación de la ciencia no puede acabar en la idolatría científica en la que vive sumergida Europa. Y es que, según Unamuno, el verdadero espíritu de la ciencia no tiene nada que ver con el fetichismo científico que late ya en la propia concepción ilustrada: «Lo que hay que hacer es destruir

ese fetichismo si se quiere que la ciencia cobre su fuerza y no nos la declaren otra vez en bancarrota» (pág. 15).

Como explica Unamuno en *Mi confesión*, lo que debe quedar del espíritu científico es, pues, la sed de verdad, que conlleva actitudes como las de humildad, templanza, tolerancia, justicia... Y es que la verdad, «que no es ni socialista, ni deísta, ni individualista, ni anarquista, ni atea... es lo que es y nada más» (pág. 45), no solo se refiere a lo racional-empírico, sino que presenta una amplitud infinita que rebasa los estrechos márgenes del positivismo. Para Unamuno, el positivismo provoca un clima de intelectualismo propio —según dice— de una burguesía intelectual ensoberbecida y envidiosa, que al final sigue sin resolver la pregunta fundamental formulada por Apolodoro en las últimas páginas de *Amor y pedagogía*: ¿para qué quiero la ciencia si no me hace feliz? «Cuantos esperan que la ciencia haga la felicidad del género humano no creen en ella, y menos en su enseñanza» (pág. 12). En resumen: ciencia sí, pero siendo dueños de ella, no sus esclavos.

Para ello ha de aceptarse que el progreso no viene dado por el avance científico al precio que sea, sino —y aquí ya va el sello unamuniano— por el inextinguible apetito de infinitud y de inmortalidad. El problema del cientificismo y de la civilización tecnocientífica (perfectamente avanzada en su cuento *Mecanópolis*, de tan recomendable lectura) consiste, sin duda, en creer que se ha saciado lo que por naturaleza es insaciable. Todo ello genera una ciencia narcótica, «un opio para ahogar los dolores del ansia de eternidad» (pág. 361).

Por último, no puede pasar inadvertido el que a mí me parece el tema capital de esta recopilación de la profesora Villar Ezcurra: la lucha espiritual entre el aprecio por la sabiduría y la razón, y el apetito irracional que se concreta en la religión. Y, con ello, sobresale otro problema medular del cientificismo: la difícil convivencia entre los aspectos espirituales e intelectuales, según los denomina Unamuno. La vocación positivista es la de arruinar aquellos en virtud de estos. A mi modo de ver, esta es una de las grandes aportaciones de Unamuno en estos escritos: quienes conceden un índice de credibilidad cero a las convicciones religiosas en virtud de un determinado patrón de racionalidad científica manejan un concepto de fe religiosa como apoyo o suplemento de la finita razón humana. Y es esto lo que, al final, les pervierte todo el argumento. Olvídense este servicio racio-

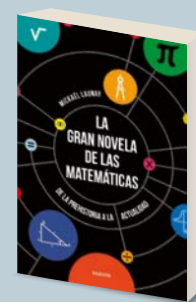
nal de la fe religiosa y se descubrirá que la religión aporta el momento de verdad extrarracional que demanda el anhelo de inmortalidad.

Por eso, dice Unamuno, «no necesito a Dios para concebir lógicamente el universo, porque lo que no me explico sin Él tampoco con Él me lo explico» (pág. 160). Aunque no queda señalado especialmente, no estaría mal reconocer la influencia del joven Hegel en Unamuno: más allá de la dogmática de la fe, fraguada por estrictas normas y recias leyes, está la vivencia del corazón, que no es otra cosa que inquietud por la inmortalidad. «Todo hombre [...] siente en sus íntimas luchas un tormento de sed y de hambre, tormento que es nuestra mayor bendición, siente un ansia de infinitud y de eternidad» (pág. 120). Por eso, frente a la sensatez del hombre están tanto el férreo positivismo como el creyente que jamás se ha preguntado por los fundamentos de su creencia (pág. 264).

En ese punto intermedio de difícil permanencia, de intranquilidad constante, de agonía (en el puro sentido etimológico de lucha) se sitúa la vida. Y de ahí su riqueza y su miseria, su fuerza y su debilidad. Efectivamente, Dios no es necesario para el conocimiento científico. Pero el hombre no solo necesita el alimento de la ciencia. Esa es la clave unamuniana. De hecho, la crisis de Europa no es una crisis de racionalidad, es una crisis del orden espiritual a cuya salvación puede acudir España. Un orden espiritual que trasciende cuando se lee atentamente *La vida es sueño*: «Debajo de esa portentosa revelación de la filosofía española verás la más vigorosa afirmación de la sobrevida» (pág. 166). No habrá ciencia en España, ciencia en el sentido de exactitud y de cálculo, pero como el hombre «no da la vida porque dos y dos sean cuatro», hay algo más que España puede ofrecer al espíritu europeo: la tradición espiritual. Y, entonces, da Unamuno una impresionante lección de amor a la patria fuera de patriotismos nacionalistas de apego ciego al terruño, y distante también de los heroísmos martiriales. Amar la patria es rendirle culto en el trabajo diario y callado y en el amor a la verdad. En definitiva, según Unamuno, España debe impedir que vuelva a suceder que «el binomio de Newton derrote a las coplas de Jorge Manrique o a *Las moradas* de Santa Teresa» (pág. 293).

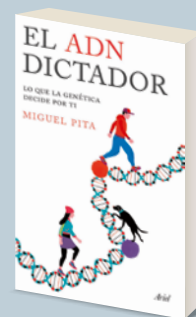
—José Manuel Chillón
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Valladolid

NOVEDADES



LA GRAN NOVELA DE LAS MATEMÁTICAS DE LA PREHISTORIA A LA ACTUALIDAD

Mickaël Launay
Paidós, 2017
ISBN: 978-84-493-3343-9
248 págs. (19,90 €)



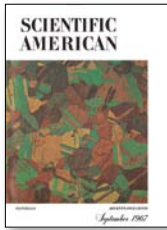
EL ADN DICTADOR LO QUE LA GENÉTICA DECIDE POR TI

Miguel Pita
Ariel, 2017
ISBN: 978-84-344-2570-5
350 págs. (16,90 €)



EDUCACIÓN, COMUNICACIÓN Y SALUD PERSPECTIVAS DESDE LAS CIENCIAS HUMANAS Y SOCIALES

Dirigido por Enrique Perdiguero-Gil y Josep M. Comelles
Publicacions Universitat Rovira i Virgili, 2017
ISBN: 978-84-8424-518-6
344 págs. (22,80 €)



Septiembre
1967

Ciencia del estado sólido

«Si tomamos un clip y lo doblamos, doblado se queda; ni se recupera ni se rompe. Del metal del que está hecho el clip decimos que es dúctil. Si tratamos de doblar un vidrio, salvo que lo sostengamos sobre una llama, se partirá. De él decimos que es frágil. En este aspecto, como en muchos otros, el comportamiento del vidrio es muy distinto al de un metal. La diferencia debe hallarse en los átomos específicos que constituyen los metales y el vidrio, o bien del modo en que se enlazan; posiblemente ambas cosas. Los estudiosos de estas cuestiones desean indagar en las causas de esa diferencia de comportamiento. Durante los últimos veinte años, las investigaciones de esta naturaleza se han conocido como física del estado sólido, o a veces sencillamente “estado sólido”, dados los numerosos aspectos químicos implicados. Se trata de una rama muy importante de la ciencia que ha revelado unas propiedades de los materiales nuevas y previamente insospechadas. Son un ejemplo las propiedades de los semiconductores, el conocimiento de los cuales ha dado lugar a dispositivos tales como el transistor. — Sir Neville Mott»

Mott compartió el Nobel de física de 1977 por sus investigaciones sobre los materiales.



Septiembre
1917

Ideas irrealizables

«Hay literalmente miles de planes, sugerencias, inventos, bosquejos, modelos y dispositivos que le llegan sin cesar al Gobierno, todos con relación a la guerra, y en su mayoría al problema de los submarinos. Una buena muestra de idea ingeniosa pero impracticable la tenemos en la propuesta de un habilidoso caballero que desarrolló y envió un proyecto para proteger de los submarinos los cascos de los barcos mediante chorros de

agua. Cualquiera que haya estado alguna vez junto a la boquilla de la manguera de un coche de bomberos se habrá dado cuenta del tremendo impacto que puede producir un chorro de agua ancho y rápido. Nuestro inventor propone una serie de tales chorros que saldrían lanzados desde los costados del buque, desviando y repeliendo el torpedo y salvando así la embarcación. Pero no calculó que los chorros que sugiere requerirían una potencia de unos diez mil caballos en la práctica, la suficiente como para mover varios mercantes.»



Septiembre
1867

Bombas contraincendios

«Aunque las bombas manuales para la extinción de incendios sigan usándose ampliamente en este país, las ciudades y poblaciones grandes han adoptado de modo generalizado la mucho más efectiva máquina de vapor, cuyos músculos de hierro y acero nunca se cansan. El Departamento Metropolitano de Bomberos de Nueva York posee no menos de treinta y cuatro máquinas, una de las cuales es el objeto de nuestro grabado.»

El emperador de la agricultura

«Con motivo de la aceptación por parte del señor McCormick de la invitación del emperador Napoleón para ofrecer una demostración privada del funcionamiento de su máquina cosechadora, al poco tiem-

po se realizó una prueba en la hacienda imperial cerca de Charlons, la cual fue presenciada por el emperador, acompañado del mariscal Neil, el general Boeuf y Eugene Tisseraud, director general de las Fincas Imperiales. El ensayo fue un éxito completo, y satisfizo tanto al emperador que este dio de inmediato órdenes para la adquisición de tres máquinas y expresó calurosamente la intención de promover la adopción del invento en toda Francia, habida cuenta de sus notables propiedades de ahorro de mano de obra. Afirmó que daría ejemplo poniendo la máquina en servicio en todas las explotaciones agrícolas imperiales.»

Una teoría sobre las pirámides

«Durante varios milenios, el propósito que llevó a la construcción de la Gran Pirámide fue un misterio para el mundo entero, y muchos de los sabios más eruditos han agotado las conjeturas y las especulaciones en sus esfuerzos por resolver el enigma. Un caballero de Londres, el señor Thomas Taylor, concibió la idea de que la estructura fue inspirada por la Divina Providencia para facilitar a los egipcios una referencia para sus pesos y medidas. Esta idea, tan extravagante y rebuscada como es, ha encontrado recientemente un partidario en esta orilla del mar, en la persona del profesor Eaton, de Nueva York, quien leyó un muy elaborado ensayo sobre el tema ante la Asamblea de la Universidad, en Albany. El profesor Eaton procedió a demostrar que la temperatura de la cámara central se mantiene uniforme en todos sus puntos, proporcionando así un lugar para guardar los contrastes de pesos y medidas.»



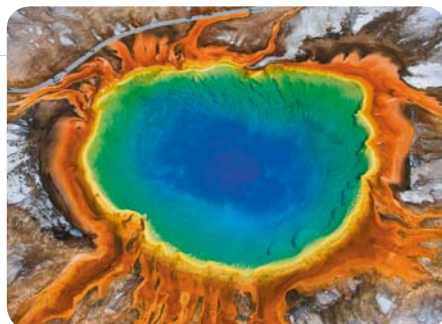
MODERNO CARRO ANTIINCENDIOS de bomba por vapor del Departamento Metropolitano de Bomberos de la Ciudad de Nueva York, 1867.

QUÍMICA

Manantiales de vida

*Martin J. Van Kranendonk,
David W. Deamer y Tara Djokic*

Nuevos hallazgos sugieren que la vida no se habría originado en las profundidades oceánicas, sino en fuentes termales volcánicas terrestres.

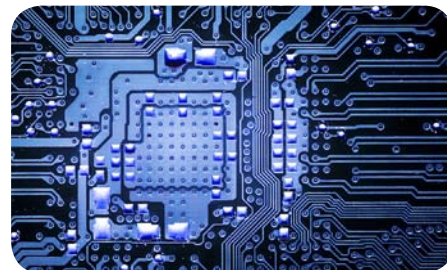


FÍSICA

Hacia el ordenador de energía cero

*Miquel López Sudrez, Igor Neri
y Luca Gammaitoni*

Un experimento ha demostrado que se puede construir un dispositivo de cálculo que funciona con una cantidad de energía arbitrariamente pequeña.



BIOLOGÍA

El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas

Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros

Décadas de estudio de la biología de los procariotas han cosechado el hallazgo de un mecanismo de inmunidad adquirida que se ha convertido en una potente herramienta de edición genética. Sus aplicaciones no parecen tener límite.

**INFORME ESPECIAL
CIUDADES SOSTENIBLES****Cómo podrían salvarnos las ciudades**

William McDonough

La movilidad del futuro

Carlo Ratti y Assaf Biderman

Aprovechamiento de residuos

Michael E. Webber

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz,
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA**Prensa Científica, S. A.**

Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Murielle DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN**para España:****LOGISTA, S. A.**

Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:**Prensa Científica, S. A.**

Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD**Prensa Científica, S. A.**

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES**Prensa Científica, S. A.**

Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO**Asesoramiento y traducción:**

Carlos Lorenzo: *Apuntes*; Juan Pedro Campos: *Apuntes y Las matemáticas de la literatura*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Raquel Reboredo e Ignacio Nasvascués: *La intrincada red de la memoria*; Mercè Piqueras: *Xylella fastidiosa, la bacteria que arrasa los olivares y El fracaso de la contención de Xylella en Italia*; Javier Grande: *Agujeros negros primordiales y materia oscura*; Marián Beltrán: *Los vikingos que desaparecieron en Groenlandia y Combatir la malnutrición*; Miguel Ángel Vázquez Mozo: *Los problemas cuánticos inspiran nuevas matemáticas*; José Oscar Hernández Sendín: *Escáneres ciegos y Hacia una inteligencia artificial más humana*; Juan Manuel González Mañas: *El epitranscriptoma, un nuevo giro de la epigenética*; J. Vilardell: *En las buhardillas de los liceos y Hace...*; A. Ramos: *La inteligencia humana contra la inteligencia artificial*

Copyright © 2017 Scientific American Inc.,
1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2017 Prensa Científica S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

Revista de psicología y neurociencias
Septiembre / Octubre 2017 · N.º 86 · 6,90 € · menteycerebro.es

Mente & Cerebro

TRABAJO
Claves para
conciliar
la vida laboral
y familiar

El arte de fluir

Los beneficios de sumergirse
en el aquí y el ahora

Capacidad cognitiva
Cómo funciona el cerebro
de los matemáticos

Nuevas tecnologías
La psicoterapia
a través del móvil, ¿es posible?

Neuropediatría
Traumatismo craneal
por maltrato

N.º 86
en tu
quiosco



www.investigacionyciencia.es
administracion@investigacionyciencia.es



Prensa Científica, S.A.